

Rendiconti Seminario Facoltà Scienze Università Cagliari Vol. 72 Fasc. 1 (2002)

Studio idrogeologico delle acque minerali dell'area di «Zinnigas» (Siliqua, Sardegna SW)

F. BORDICCHIA(*), C. MARINI(*), A. PALA(*)

Abstract. *In the area of Zinnigas (near Siliqua, Sardegna SW) a limited extension drainage basin is present with numerous springs. The area is center of activity for catchment and bottling of the mineral waters. We think that the dimension of the ground water basin is greater than hydrologic basin. The aim of the study is to improve the knowledges on the basin and particularly:*

- *to settle the formalities of circulation of the underground waters;*
- *to reconstruct the acquifer geometry;*
- *to draw the main hydrologic parameters.*

Riassunto. *Nell'area di Zinnigas situata nel territorio di Siliqua, è presente un bacino imbrifero di estensione limitata che vede la presenza di numerose sorgenti. L'area è sede di un'attività per la captazione e l'imbottigliamento delle acque minerali. È ipotizzabile che la dimensione del bacino idrogeologico sia molto maggiore di quella del bacino imbrifero. Lo scopo dello studio è quello di approfondire le conoscenze sul bacino ed in particolare:*

- *individuare le modalità di circolazione delle acque sotterranee;*
- *ricostruire la geometria dell'acquifero;*
- *ricavare i principali parametri idrogeologici.*

PREMESSA

La sempre minore disponibilità di acque per uso potabile crea una forte richiesta di acque a scopo alimentare. La Sardegna è risultata, anche da dati ISTAT, una delle regioni in Italia in cui il consumo di tale risorsa è ai massimi livelli. Nasce da queste considerazioni lo studio geoidrologico di un'area che, nonostante la limitata estensione areale, è sede di numerose captazioni per l'imbottigliamento di acque oligominerali.

Situata sul bordo meridionale della pianura del Cixerri, la zona di Zinnigas è ricca di sorgenti e da ciò deriva appunto il toponimo *zinnia* che nel dialetto del luogo indica il giunco o più genericamente le piante palustri.

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Cagliari.
Presentato il 21/06/2002.

L'area in questione, in agro di Siliqua (Sardegna SW), individua un bacino imbrifero di appena 0,5 km² ed è sede di un'attività di captazione ad opera della S.A.M. (Sarda Acque Minerali) di Cagliari.

La società coltiva dal 1976 la sorgente Mitza Migheli le cui acque vengono imbottigliate con il nome commerciale di Acqua San Giorgio, mentre in tempi più recenti ha messo in produzione altre sorgenti, tutte captate mediante trivellazioni profonde, con le denominazioni Pura, Sant'Angelo, Levia.

Per approfondire le conoscenze sul bacino idrogeologico si è effettuato uno studio con la finalità di:

- 1) definire il tipo di circolazione idrica, identificando i limiti e le direzioni di deflusso;
- 2) ricostruire la geometria dell'acquifero individuando le aree di alimentazione e di drenaggio.
- 3) definire i principali parametri idrologici delle formazioni interessate;
- 4) identificare le possibili vie di inquinamento e valutare la capacità di autodepurazione naturale dell'acquifero.

STRUTTURA GEOLOGICA E GEOMETRIA DELL'ACQUIFERO

La località di Zinnigas si identifica con l'omonima piccola valle del versante settentrionale dei monti del Sulcis (M.te Orri, 722 m s.l.m.) con direzione Nord-Sud, che si affaccia in destra della valle del Cixerri. Il reticolo idrografico, molto limitato, incide le formazioni, debolmente metamorfiche ma interessate da scistosità penetrativa, del basamento ercinico. Il lineamento tettonico più importante dell'area è il contatto tettonico lungo il quale le formazioni cambro-ordoviciane dell'Unità tettonica dell'Arburese sono sovrascorse sulle formazioni ordo-siluriane del basamento autoctono del Sulcis – Iglesiente [1] (figura 1). Il sovrascorrimento è ben esposto nell'area compresa tra la faglia del Cixerri a Sud e il M. Orri a Nord. Le formazioni alloctone sono costituite da metarenarie, metasiltiti e argilloscisti, mentre le formazioni autoctone sono costituite da metarenarie e metasiltiti dell'Ordoviciano superiore [2] e dagli scisti neri grafitici, che affiorano in finestra tettonica presso la Mitza Migheli e nell'area circostante il sondaggio S1 (figura 1).

Le rocce scistoso-metamorfiche sono correntemente ritenute in Sardegna scarsamente permeabili se non addirittura impermeabili, pertanto, l'abbondante circolazione d'acqua della zona, deve essere messa in relazione con una fratturazione importante che superando gli spartiacque topografici consenta la circolazione delle acque dai bacini limitrofi. A questo proposito si osserva che tutte le formazioni paleozoiche sono interessate da numerose faglie e fratture, sovente con filoni e brecce di quarzo, in corrispondenza delle quali si trovano le emergenze.

Le principali faglie individuate sono:

- a) Faglie di Is Abieddus (IA), fra loro incrociate (Nord-Sud e Ovest-Est) e interessate da filoni di quarzo.

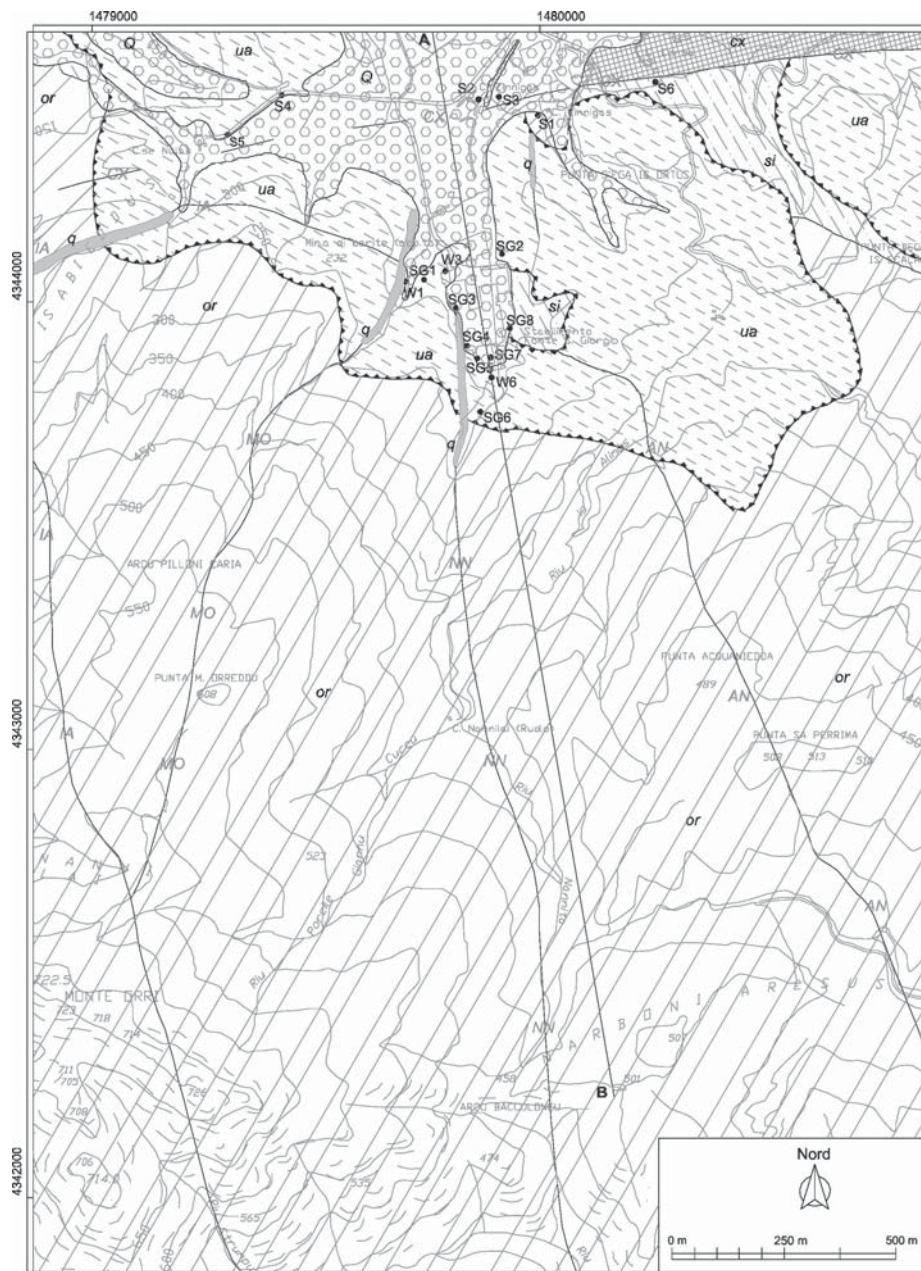


Figura 1. Carta geologica, ubicazione dei sondaggi e traccia della sezione A-B (per la legenda si veda fig. 2).

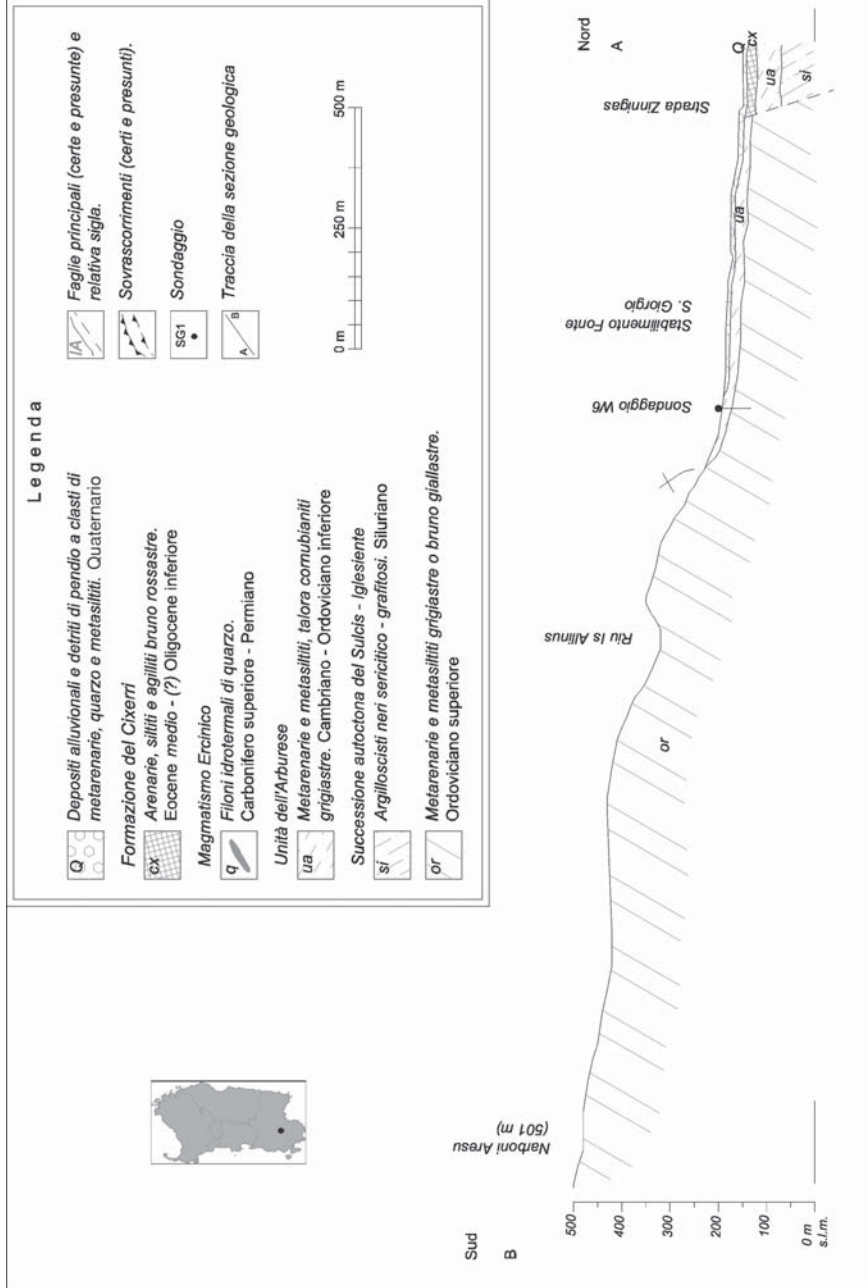


Figura 2. Profilo geologico lungo la traccia A-B e ubicazione dell'area studiata.

- b) Faglia di M.te Orri (MO) di direzione Nord-Sud, notevolmente inquarzata.
- c) Faglia di Nannilai (NN), con caratteristiche analoghe alle precedenti, in corrispondenza della quale ricade la sorgente di Mitza Migheli.
- d) Faglia di Acquanedda (AN) convergente anch'essa verso la zona sorgenzia di Zinnigas.

La faglia del Cixerri (CX), si differenzia da queste ultime perché è molto più recente e costituisce un importante elemento tettonico di carattere regionale con direzione Est-Ovest, che mette a contatto le formazioni paleozoiche e la formazione arenaceo-siltitico-argillosa del Cixerri, riferibili all'Eocene medio – Oligocene inf. (?). Questa faglia quindi delimita l'omonimo graben terziario e, sotto l'aspetto idrogeologico, costituisce un vero e proprio limite di tamponamento tra la formazione del Cixerri, impermeabile, e la serie paleozoica fessurata [4].

Al fine di verificare i rapporti stratigrafico-tettonici ed entrare in possesso di nuovi dati anche in relazione alle caratteristiche dell'acquifero, sono stati eseguiti diversi sondaggi, anche a carotaggio continuo.

Le stratigrafie dei sondaggi, la cui ubicazione è riportata nella carta geologica di figura 1, sono qui di seguito descritte.

Stratigrafie dei sondaggi

- S1 (falda artesianiana a +3 m sul piano di campagna, T acqua 26°C)

0-6 m	Argilloscisti neri degradati (Successione del Sulcis – Iglesiente, Siluriano)
6-12 m	Argilloscisti neri brecciati (Successione del Sulcis – Iglesiente, Siluriano)
12-30 m	Argilloscisti neri interessati da vene di quarzo e da diaclasi (Successione del Sulcis – Iglesiente, Siluriano)

- S1

0-2,5 m	Suolo
2,5-9,2 m	Siltiti argillose violacee (F.ne del Cixerri)
9,2-10,5 m	Arenarie violacee (F.ne del Cixerri)
10,50-13 m	Siltiti arenacee (F.ne del Cixerri)
13-15,30 m	Arenarie a grana media rosse con diaclasi (F.ne del Cixerri)
15,30-16,50 m	Arenarie conglomeratiche rosse (F.ne del Cixerri)
16,50-22 m	Conglomerati arenacei (F.ne del Cixerri)
22-26 m	Argilloscisti e metarenarie bruno - giallastre quarzoso - sericitiche (Unità dell'Arburese, Cambro - Ordoviciano)

- S3

0-3 m	Suoli argillosi, detriti alluvionali e di pendio a frammenti di rocce del Paleozoico
3-5 m	Arenarie e siltiti (F.ne del Cixerri)
5-12 m	Arenarie a grana media con diaclasi suborizzontali (F.ne del Cixerri)

- 12-13 m Arenarie conglomeratiche (F.ne del Cixerri)
 13-14 m Breccie di metarenarie riferibili all'Unità dell'Arburese (Cambro - Ordoviciano)
 14-20 m Metarenarie quarzoso - sericitiche con diaclasi assai frequenti patinate di ossidi di ferro e d'argilla (Unità dell'Arburese, Cambro - Ordoviciano)

• S4 (falda risaliente da m 57 a m 19 sotto il boccaforo, T acqua 19°C)

- 0-57 m Metarenarie bruno - giallastre con diaclasi subverticali intercalate a livelli di metapeliti e metasiltiti (Cambro - Ordoviciano – Unità dell'Arburese)
 57-100 m Argilloscisti neri con quarzo, fratturati (Successione del Sulcis – Iglesiente, Siluriano)

• S5 (falda risaliente da m 60 a m 20 sotto il boccaforo, T acqua 19°C)

- 0-60 m Metarenarie bruno-giallastre con diaclasi subverticali, intercalate a livelli di metapeliti e metasiltiti (Unità dell'Arburese, Cambro - Ordoviciano)
 60-100 m Argilloscisti neri con quarzo, fratturati (Successione del Sulcis – Iglesiente, Siluriano)

• S6 (falda risaliente a boccaforo, T acqua 20°C)

- 0-20 m Argilloscisti neri con quarzo (Successione del Sulcis – Iglesiente, Siluriano)

I principali dati idrogeologici dei sondaggi sono riassunti nelle tabelle 1 e 2.

Tabella 1. Dati relativi ai sondaggi effettuati.

Pozzo	Località	Portata (l/s)	Boccaforo (m s.l.m.)	Liv.Piez. (m s.l.m.)
S1	Canneto	6	154,0	157,0
S4	Curva strada	2	166,2	146,6
S5	Casa Mulas	1	168,8	148,8
S6	Casa Corda	3-4	150,0	150,0

Tabella 2. Dati relativi ai pozzi già in esercizio.

Fonte	Pozzo profondità (m dal P.C.)	Portata		Boccaforo (m s.l.m.)	Liv.Piez. (m s.l.m.)
		massima (l/s)	emunta (l/s)		
W1 Pura	98	6,11	2,00	190,9	159,7
SG1 San Giorgio	62	0,44	0,11	188,7	159,7
W3 Levia	72	3,06	1,51	182,8	153,4
SG3 San Giorgio	55	0,67	0,51	183,8	-
SG4 San Giorgio	50	0,67	0,51	183,2	154,3
SG5 San Giorgio	82	3,06	2,00	185,1	164,5
W6 Sant'Angelo	60	1,11	0,51	184,6	158,1
SG7 San Giorgio	60	0,67	0,51	188,6	167,9
SG8 San Giorgio	116	6,11	2,00	185,2	163,5

Dall'analisi dei dati ricavati dai sondaggi e dalle stratigrafie dei pozzi già esistenti, si è potuto quindi stabilire che l'acquifero è costituito dalle formazioni Siluriane e Ordoviciane scistoso-metamorfiche del basamento autoctono del Sulcis-Iglesiente, fratturato e inquartzato, che localmente presenta uno spessore di 150 m, anche se è stato valutato che nel Sulcis la sua potenza raggiunge i 500 m [3], al contrario le litologie cambro-ordoviciane dell'Unità dell'Arburese che sono sovrascorse sulle prime sono scarsamente permeabili e nell'area di studio hanno spessori compresi tra i 20 e i 60 m.

L'improduttività dei sondaggi S2 e S3, posizionati a Nord della faglia del Cixerri, conferma l'impermeabilità dell'omonima formazione.

I pozzi hanno costantemente intercettato falde in pressione, e il sondaggio S1 ha portato a giorno un'acqua termale (26°C) che fuoriesce con una prevalenza di 3 m sul piano di campagna. La presenza dell'acquifero ipotermale era già nota per l'esistenza di altre emergenze, allineate lungo la faglia del Cixerri, di portate molto limitate e con temperature tra 20° e 25° C.

CONSIDERAZIONI SUL CHIMISMO DELLE ACQUE

Le analisi chimiche delle acque intercettate nei sondaggi più recenti confrontate con quelle dei pozzi già in esercizio permettono di trarre alcune considerazioni sull'origine e la natura degli acquiferi.

Le acque dei pozzi preesistenti sono, per quanto riguarda il chimismo, classificate come cloro-alcaline e oligominerali, presentano un residuo fisso piuttosto basso, inferiore ai 300 mg/l, e una durezza totale intorno ai 10-12°F, la quantità dei sali disciolti è bassa. Le loro temperature non superano i 19°C. Queste acque, il cui acquifero è rappresentato dalle litologie metamorfiche, traggono alimentazione dal bacino imbrifero, quindi con tempi di circolazione e ricambio valutabili in cicli di pochi anni.

Le acque intercettate dai sondaggi S1 ed S6 hanno invece temperature di 26°C e di 20°C rispettivamente, chimismo caratterizzato da cloruri, inferiori rispetto alle precedenti e subordinati rispetto ai bicarbonati, calcio elevato, conducibilità elettrica alta. Il sondaggio S6 rispetto al sondaggio S1 sembra avere subito una diluizione. Si tratta comunque di acque termali che hanno circolato in profondità, e che risalendo lungo le faglie possono miscelarsi più o meno marcatamente con le acque oligo-minerali incontrate.

Un discorso diverso invece deve essere fatto per i sondaggi S3 e S5 che hanno captato delle acque con temperature in equilibrio con quella dell'aria, salinità e cloro elevati e una notevole durezza. Ciò è giustificabile ritenendo che le acque giungano a contatto con la Formazione del Cixerri, ricca di livelli a cloruri solfati e bicarbonati; questo fatto inoltre porta a supporre una prosecuzione della faglia del Cixerri entro i terreni paleozoici a Nord-ovest di Zinnigas.

PARAMETRI IDRODINAMICI

Prove d'emungimento

Al fine di valutare i parametri idrogeologici, sono state realizzate prove d'emungimento, sia a portata variabile sia continua, utilizzando i pozzi già in esercizio denominati W1 e SG5, in quanto erano quelli più profondi, con posizione più favorevole perché vicini ad altri pozzi impiegabili come piezometri e con portate di emungimento più elevate. Lo scopo delle prove è stato quello di determinare la presenza di perdite di carico nelle opere e nelle immediate vicinanze, la portata critica e la portata massima di eventuale sfruttamento.

Prove a gradini

Le prove sono state eseguite realizzando quattro gradini di portata, ciascuno della durata di 1^h, seguiti da una fase di risalita all'incirca dello stesso tempo. La portata iniziale è stata posta uguale alla portata minima della pompa. I dati relativi alle prove vengono riassunti nelle tabelle 3, 4 e 5. I dati relativi alle tabelle 3 e 5 sono riferiti al pozzo W1 in due differenti stagioni.

Tabella 3. Risultati prove a gradini del pozzo W1 (periodo autunnale).

Gradini di portata N°	Depressioni Δ (m)	Portate Q (m ³ /h)	Portate specifiche Q/ Δ (m ² /h)	Depressioni specifiche Δ /Q (h/m ²)
1	1,38	1,33	0,965	1,037
2	3,75	3,60	0,960	1,041
3	7,25	6,93	0,950	1,046
4	10,61	8,75	0,820	1,212

Tabella 4. Risultati prove a gradini del pozzo SG5.

Gradini di portata N°	Depressioni Δ (m)	Portate Q (m ³ /h)	Portate specifiche Q/ Δ (m ² /h)	Depressioni specifiche Δ /Q (h/m ²)
1	2,84	4,248	1,496	0,668
2	4,74	6,969	1,470	0,680
3	7,02	9,777	1,393	0,718
4	8,21	10,704	1,304	0,767

Tabella 5. Risultati prove a gradini del pozzo W1 (periodo primaverile).

Gradini di portata N°	Depressioni Δ (m)	Portate Q (m ³ /h)	Portate specifiche Q/ Δ (m ² /h)	Depressioni specifiche Δ /Q (h/m ²)
1	0,33	0,387	1,17	0,85
2	0,96	0,936	0,97	1,03
3	3,55	2,700	0,76	1,31
4	5,63	3,710	0,66	1,52
5	6,49	4,140	0,63	1,58

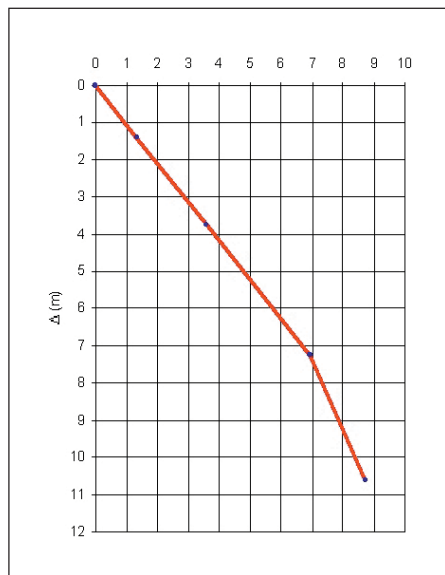


Figura 3. Curva caratteristica del pozzo W1 (dati tab. 3).

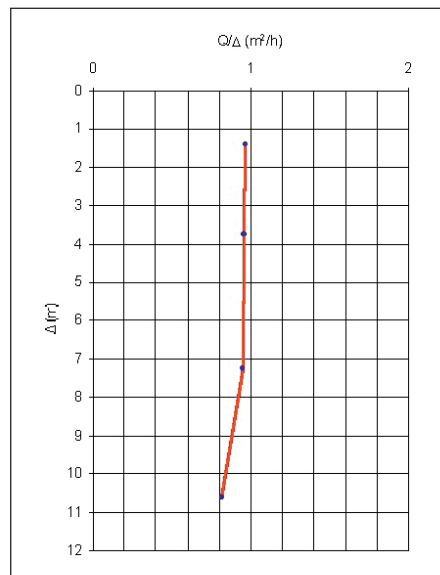


Figura 4. Grafico Portate specifiche – Depressioni del pozzo W1 (dati tab. 3).

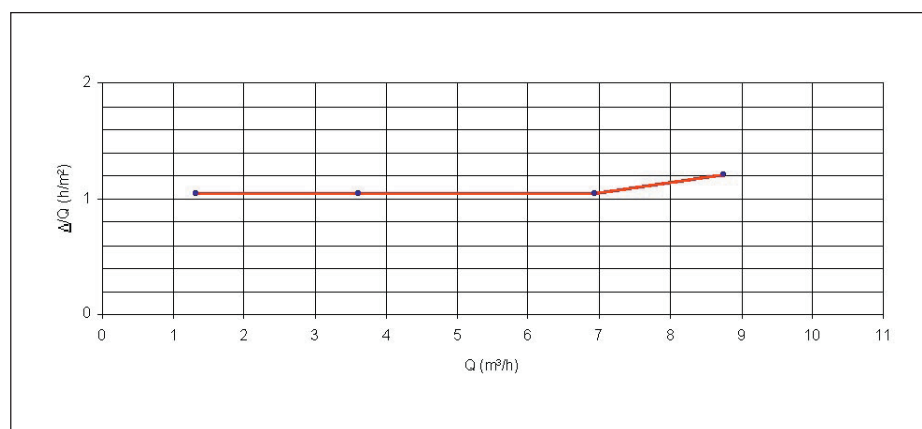


Figura 5. Grafico Portate – Depressioni specifiche del pozzo W1 (dati tab. 3).

La figura 3, portate – depressioni [5], riproduce la curva caratteristica del pozzo W1, che assume nel primo tratto un andamento lineare, ad indicare la proporzionalità diretta tra portate emunte e abbassamenti.

Dal grafico si deduce che la portata ideale per un emungimento prolungato è di 6,9 m³/h (1,92 l/s).

La figura 4 riporta una spezzata, e pone in luce l'anisotropia e la non omogeneità

dell'acquifero anche a grande scala; ciò è legato al fatto che per portate di emungimento inferiori a quella critica, si mobilitano le acque nelle fratture più aperte per cui gli attriti sono trascurabili. Aumentando l'emungimento sono richiamate anche le acque circolanti nelle microfratture, comportando l'aumento delle perdite di carico.

L'interpretazione di ciò, si direbbe confermata anche dall'andamento della curva della figura 5 (Portate – Depressioni Specifiche), la cui equazione è del tipo:

$$\Delta = BQ + CQ^2$$

nella quale:

- BQ rappresenta le perdite di carico lineari provocate dal deflusso durante l'emungimento nelle vicinanze del pozzo;
- CQ² costituisce le perdite di carico quadratiche dovute al deflusso turbolento, e conseguenti attriti, nelle varie parti dell'opera (tubature, filtri).

Nel caso in questione, il diagramma è costituito da una spezzata che pone in evidenza come all'aumentare degli emungimenti, dopo un certo valore della portata, si risente delle perdite di carico.

Il discorso è analogo per il pozzo SG5, i cui dati sono diagrammati nelle figure 6, 7 e 8.

Un'ulteriore prova a gradini è stata eseguita sul pozzo W1 (figure 9, 10, 11) in un differente periodo dell'anno, utilizzando però delle portate inferiori, indagando di conseguenza un inferiore spessore di acquifero. Questa volta, però si è posto in luce come le perdite di carico di tipo quadratico, siano particolarmente elevate in conseguenza dell'ostruzione della pompa da parte di depositi di ossidi di ferro.

Prove di lunga durata

La determinazione dei parametri idrogeologici dell'acquifero, quali la trasmissività (T) e il coefficiente di immagazzinamento (S), è stata possibile effettuando una prova d'emungimento a portata costante. La portata deve essere prossima a quella di esercizio, e durante le prove effettuate si è preferito usare sempre una portata che fosse leggermente superiore a quella critica.

La formula che comunemente è utilizzata per il calcolo dei parametri suddetti, è quella di approssimazione logaritmica di Jacob [5], in cui gli elementi utili allo svolgimento della formula sono i seguenti:

Q = portata (l/s)	x = distanza piezometro - pozzo (m)
t ₀ = tempo fittizio (s)	C = coefficiente angolare della retta di regressione

con riferimento alle figure 12, 13, 14, dove in ascissa, in scala logaritmica, sono rappresentati i tempi, mentre in ordinata, in scala aritmetica, sono riportate le depressioni della superficie piezometrica.

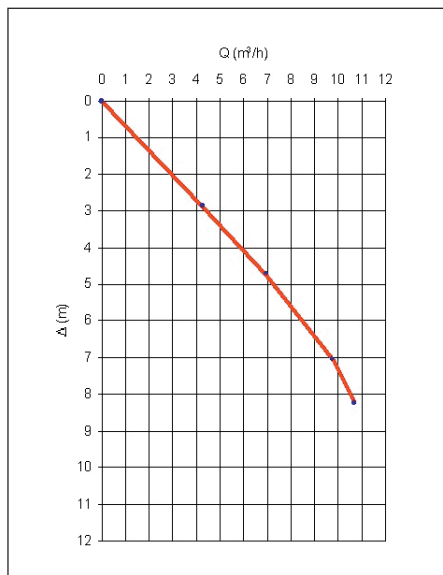


Figura 6. Curva caratteristica del pozzo SG5 (dati tab. 4).

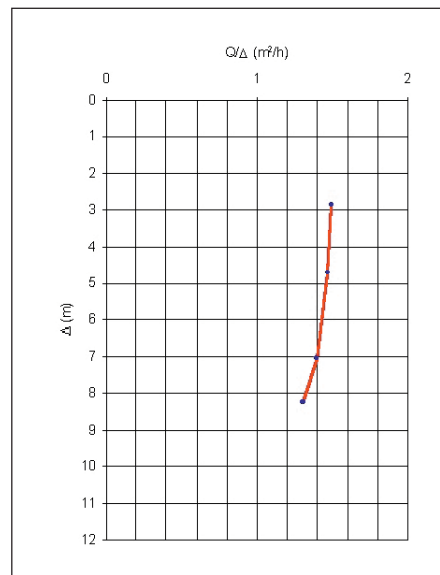


Figura 7. Grafico Portate specifiche – Depressioni del pozzo SG5 (dati tab. 4).

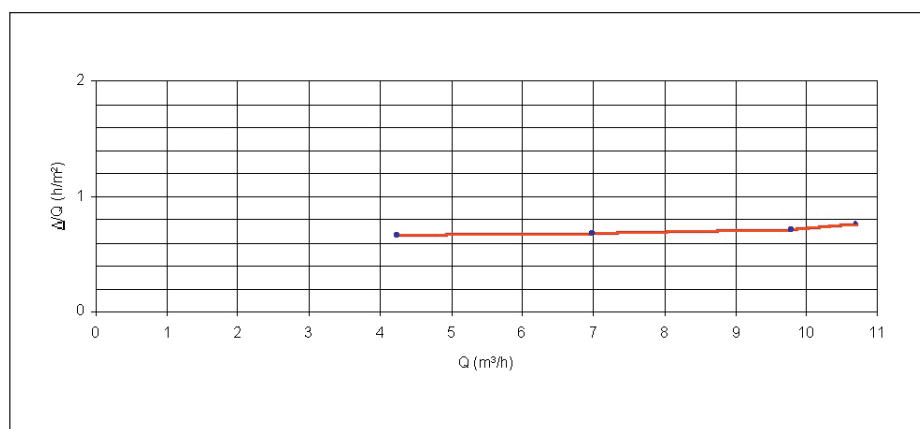


Figura 8. Grafico Portate – Depressioni specifiche del pozzo SG5 (dati tab. 4).

Una prima prova è stata eseguita sul pozzo W1, utilizzando come piezometro per la determinazione degli abbassamenti del livello della superficie freatica il pozzo SG1, che si trova a una distanza dal primo di 45,75 m; la portata di emungimento è stata di 2,43 l/s (una portata leggermente superiore a quella critica), e l'indagine si è protratta per quattro giorni, durante il periodo autunnale.

Nel grafico in figura 12, si vede come l'allineamento dei punti secondo una retta

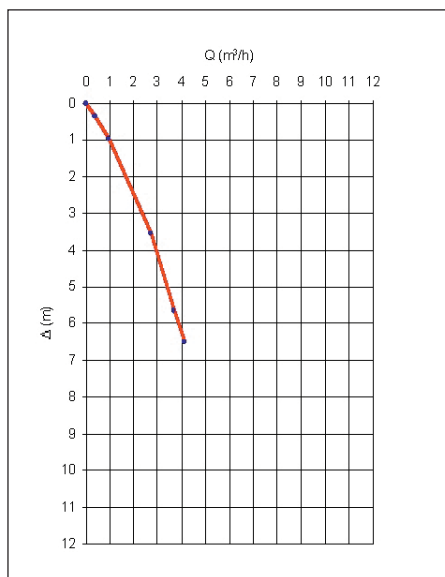


Figura 9. Curva caratteristica del pozzo W1 (dati tab. 5).

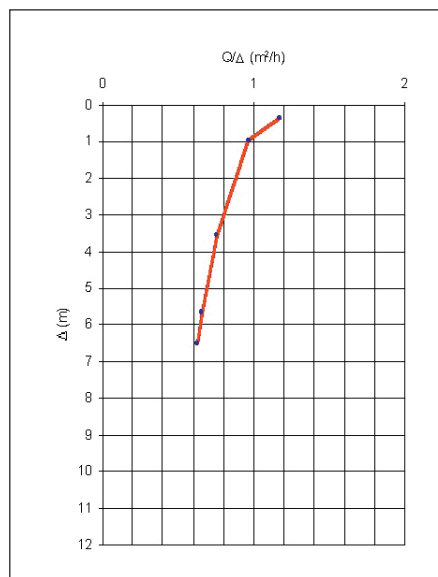


Figura 10. Grafico Portate specifiche – Depressioni del pozzo W1 (dati tab. 5).

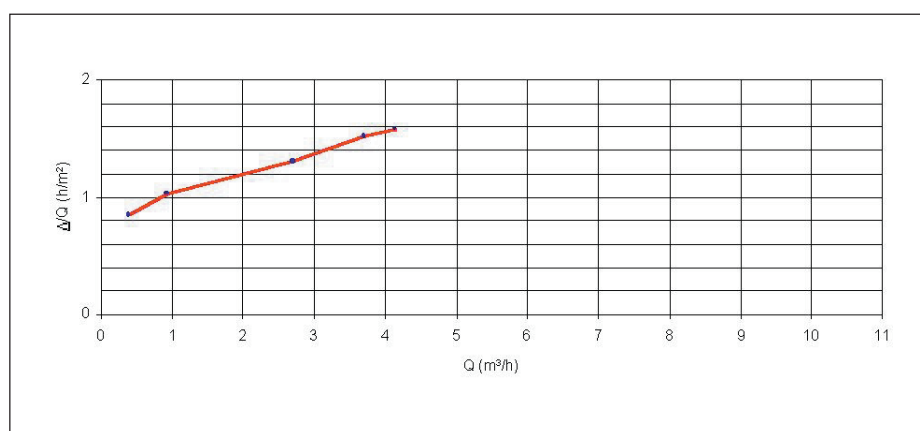


Figura 11. Grafico Portate – Depressioni specifiche del pozzo W1 (dati tab. 5).

avviene dopo circa 2^{h30} , tempo necessario per eliminare l'effetto di capacità del pozzo.

L'interpretazione, può essere effettuata nel tratto di grafico rettilineo utilizzando come valori i seguenti:

$$Q = 2,43 \text{ l/s} \quad x = 45,75 \text{ m}$$

$$t_0 = 2.088 \text{ s} \quad C = 0,80$$

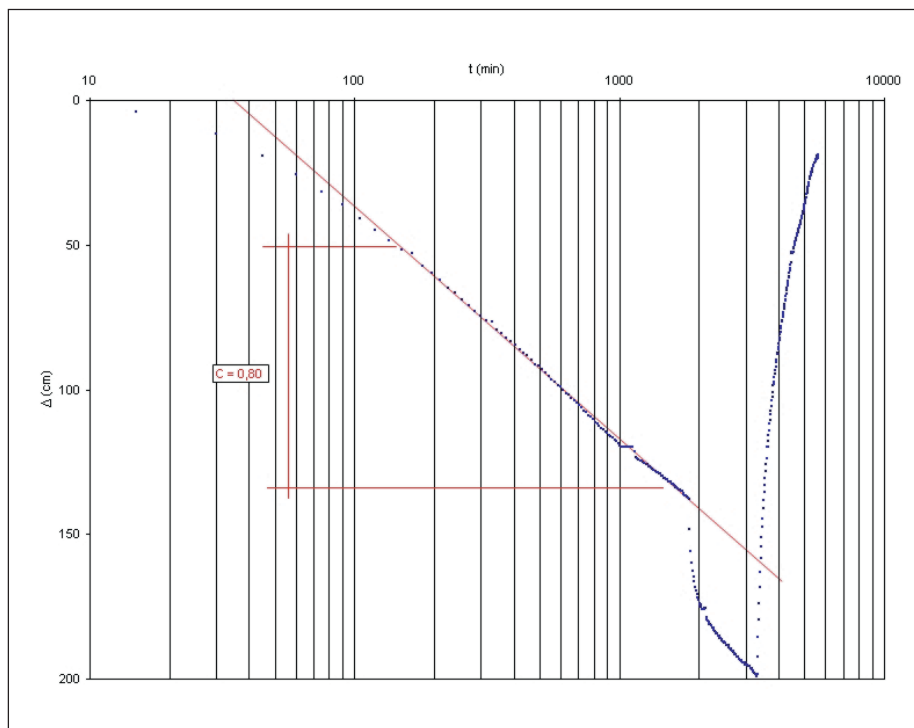


Figura 12. Prova di emungimento a portata costante del pozzo W1 (scala semilogaritmica).

ricavando per la Trasmissività e il Coefficiente di Immagazzinamento:

$$T = 0,183 \frac{Q}{C} = 5,56 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad S = \frac{2,25 \cdot T \cdot t_0}{x^2} = 1,25 \times 10^{-3}$$

Dal grafico è possibile notare come l'andamento decrescente sia proseguito regolarmente per 30^h e si sia interrotto quando è stato messo in funzione il pozzo W3 che dista dall'SG1 52 m; questa interferenza è chiaramente evidenziata: il livello subisce un abbassamento repentino riprendendo un andamento progressivamente decrescente solo dopo diverse ore.

Due ulteriori prove sono state eseguite sul pozzo SG5, in differenti periodi dell'anno, una prima volta in autunno e successivamente in primavera, con lo scopo di verificare i dati raccolti dopo un periodo di apporti pluviometrici. Va però detto che a causa di un'annata particolarmente siccitosa, le condizioni di emungimento non hanno subito considerevoli modificazioni.

La prima prova sull'SG5, è stata effettuata con una portata costante di 2,97 l/s utilizzando come piezometro il pozzo SG7 posto ad una distanza di 35,60 m dal pozzo di emungimento.

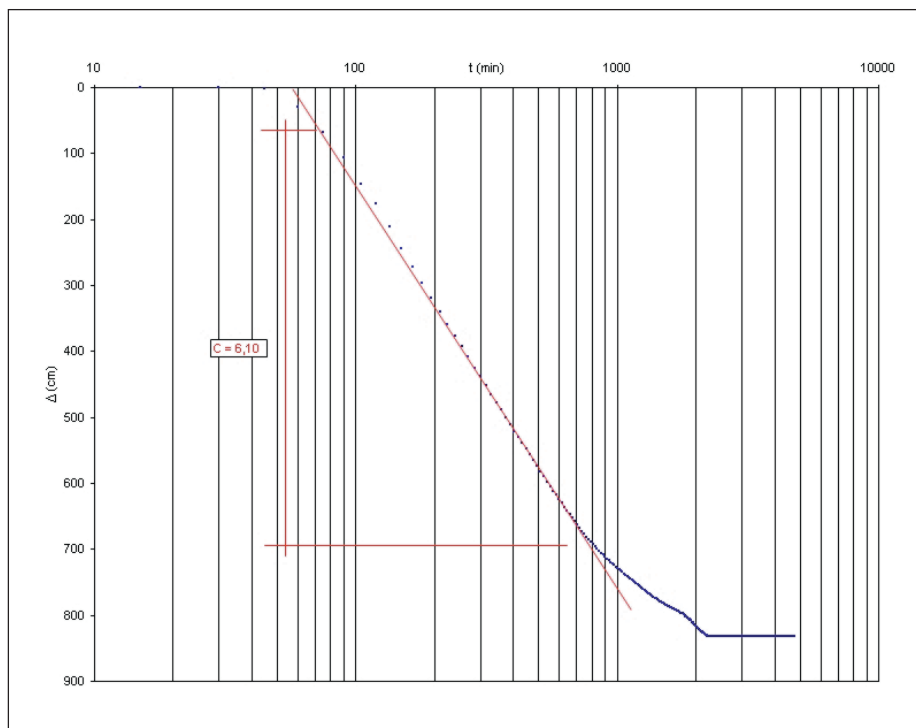


Figura 13. Prova di emungimento a portata costante del pozzo SG5 nel periodo invernale (scala semilogaritmica).

Anche in questo caso la portata utilizzata è stata di poco superiore a quella d'esercizio: 2,97 l/s. Il grafico in figura 13, in questo caso, mostra una pendenza della curva accentuata nella prima parte ed una leggera diminuzione della stessa nella seconda parte. Ciò può essere dovuto al fatto che l'acquifero non omogeneo ha delle variazioni di Trasmissività ad una certa distanza dal piezometro.

L'interpretazione, utilizzando i dati riportati di seguito:

$$Q = 2,97 \text{ l/s} \quad x = 35,60 \text{ m}$$

$$t_0 = 3.600 \text{ s} \quad C = 6,10$$

fornisce una Trasmissività ed un Coefficiente d'Immagazzinamento pari rispettivamente a:

$$T = 0,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} \quad S = 5,11 \times 10^{-4}$$

Prima e dopo la prova si è provveduto a misurare i livelli nei pozzi circostanti: SG4, SG6, SG8, W6. L'unico abbassamento si è registrato nel pozzo SG4 situato a circa 30 m

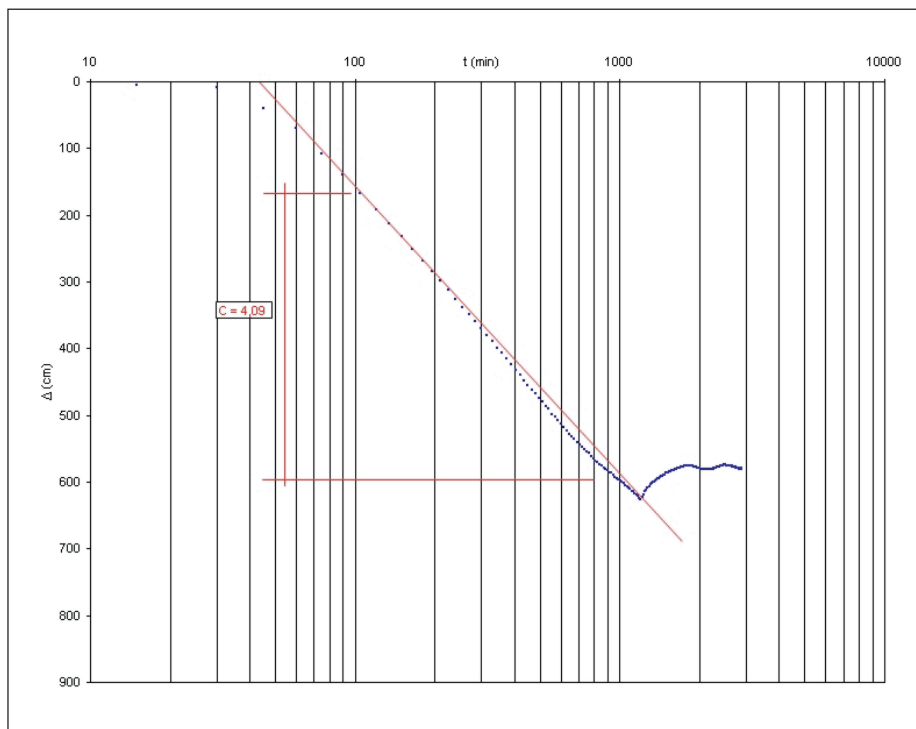


Figura 14. Prova di emungimento a portata costante del pozzo SG5 nel periodo primaverile (scala semilogaritmica).

dal pozzo di emungimento SG5. Si è notato che le interferenze durante l'emungimento si rilevano nei pozzi disposti secondo l'allineamento Est-Ovest, il che fa supporre che l'anisotropia dell'acquifero si sviluppi principalmente lungo questa direzione.

Nel pozzo SG5, la prova è stata ripetuta durante la stagione primaverile e si è protratta per due giorni con una portata di 2,24 l/s. I risultati (in figura 14) hanno confermato quelli ottenuti con la precedente prova, assumendo $t_0 = 2.048$ s e $C = 4,09$:

$$T = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 3,64 \times 10^{-4}$$

BILANCIO IDROLOGICO

Al fine di quantificare l'entità delle riserve del bacino idrologico considerato si è proceduto al calcolo del Bilancio Idrologico, che può essere presentato dalla formula:

$$P = Er + D + I$$

dove:

- P = Precipitazioni
- Er = Evapotraspirazione reale
- D = Deflussi superficiali
- I = Infiltrazione

La differenza tra le Precipitazioni e l'Evapotraspirazione è pari al Deflusso globale presunto, vale a dire la somma dei deflussi superficiali e dell'Infiltrazione.

Per risalire ai valori di afflusso meteorico, si è fatto ricorso ai dati desumibili dalle due stazioni pluviometriche di Terraseu (325 m s.l.m.) e di Miniera Rosas (326 m s.l.m.), relativamente a un periodo di osservazione di cinquanta anni.

Considerando un'estensione del bacino limitata presumibilmente a 7,8 km², si è adottato quale valore medio di afflusso meteorico quello risultante dalla media aritmetica dei valori medi cinquantennali di ciascuna stazione, da cui risulta che:

Terraseu	mm 828
Min.ra Rosas	mm 923
P medio	mm 876

Poiché nessuna delle due stazioni utilizzate è attrezzata di strumentazione per la rilevazione delle temperature, si è determinata la temperatura fittizia.

Sulla base delle termometrie note di tutta la Sardegna meridionale si è proceduto alla determinazione della retta rappresentativa della legge di variazione lineare tra la temperatura e l'altimetria. Una volta disegnata la retta si è ottenuto il valore della temperatura che corrisponde alla quota desiderata.

Essendo le stazioni di Terraseu e di Rosas situate quasi alla stessa altitudine la temperatura fittizia risulta per entrambe di 15,6°C.

L'Evapotraspirazione reale media annua è stata calcolata con la formula di L. Turc, applicando la modificazione operata da M. Santoro [6] per la Sicilia. La formula, ampiamente collaudata a diverse latitudini e con bacini di differenti dimensioni, è quella che meglio si adatta al clima della Sardegna:

$$E_r = \frac{P}{0,9 + \sqrt{\frac{P^2}{L^2}}}$$

in cui $L = 586 - 10 T + 0,05 T^3$

Adottando una pluviometria di 876 mm ed una temperatura media annua di 15,6°C l'Evapotraspirazione reale risulta di 379 mm ed il Deflusso globale presunto 497 mm.

Da quanto visto in precedenza, di questi 497 mm una certa aliquota defluisce

superficialmente, il resto alimenta le riserve sotterranee. Se s'ipotizza un'infiltrazione effettiva del 20%, (valore che è statisticamente suggerito per le rocce metamorfiche) si ha una quantità delle riserve sotterranee pari a 15 l/s.

Il calcolo esposto si riferisce alle acque più superficiali, quelle che, infiltratesi all'interno del bacino idrografico, alimentano un ciclo annuale. Non rientrano invece in questo computo le acque ipotermali che sono state localizzate e captate con il sondaggio S1, le cui caratteristiche prospettano in genere tempi di circolazione molto lunghi (dell'ordine delle centinaia di anni), come è stato evidenziato in acque similari anche in Sardegna con le metodiche di studio sugli isotopi. Determinare il «circuito» di queste acque richiederebbe uno studio specialistico a parte. La loro area (o le aree) di alimentazione può essere, infatti, molto remota e l'infiltrazione può avvenire molto lentamente spingendosi a notevoli profondità, dove le acque acquisiscono temperature più o meno elevate in funzione del gradiente geotermico. La risalita, nella maggior parte dei casi, ha luogo in prossimità di una discontinuità tettonica in tempi che, grazie alle pressioni che si sono determinate nell'acquifero profondo, sono notevolmente inferiori a quelli d'infiltrazione.

CONCLUSIONI

In base ai risultati della nuova campagna di sondaggi geognostici, delle prove di emungimento, del rilevamento di campagna e dello studio aereofotogeologico, si possono trarre le seguenti conclusioni:

1) L'acquifero è costituito dagli argilloscisti e dalle metasiltiti dell'Ordoviciano e Siluriano. Queste formazioni, appartenenti alla successione autoctona del Sulcis - Iglesiente, si presentano intensamente fratturate e intersecate da faglie dirette spesso da filoni di quarzo a loro volta tettonizzati e più o meno intensamente brecciati. La potenza minima dell'acquifero riscontrata nei sondaggi, al disotto del piano di campagna, è di un centinaio di metri, ma verosimilmente il suo spessore reale è di almeno 150 m.

2) I limiti di permeabilità dell'acquifero in questione sono rappresentati dai contatti fra il complesso ordoviciano-siluriano autoctono e la formazione alloctona di età cambro-ordoviciano dell'Unità dell'Arburese a tetto e la faglia subverticale del Cixerri che lo delimita a Nord.

Una struttura come quella descritta conferisce alla falda caratteristiche artesiane, così come è stato ben evidenziato dalle prove di pozzo. La permeabilità, dovuta esclusivamente alla circolazione nelle fratture, può essere definita medio-alta in base alle misure di trasmissività. La direzione di deflusso delle acque sotterranee avviene da Sud verso Nord, lungo le faglie principali che hanno spesso condizionato la morfologia, e viene bloccato a valle, dalla faglia del Cixerri che ha direzione Est-Ovest ortogonale alle precedenti.

L'alimentazione avviene per infiltrazione diretta su un bacino presumibilmente delimitato da uno spartiacque che percorre le cime di M.te Orri, M.te Sisineddu, Perda Bianca, Guardia Nuciau e Concas Arrubias.

Dal Bilancio Idrologico eseguito risulta che i valori di alimentazione individuati sono ampiamente compatibili con la ricarica annuale delle risorse sino ad oggi sfruttate.

3) L'area sulla quale insistono i pozzi presi in considerazione dallo studio è troppo limitata per poter costruire una carta delle isofreatiche; tuttavia, dai livelli idrici rilevati risulta una superficie piezometrica posta tra le quote di m 146 e di m 168 sul l.m., corrispondente ad una profondità di 20-30 metri sotto il piano di campagna.

4) Mediante le prove di emungimento di lunga durata si sono determinati i parametri idraulici dell'acquifero: la Trasmissività è risultata mediamente di $2,5 \cdot 10^{-4}$ m²/s, il Coefficiente di immagazzinamento di $7,1 \cdot 10^{-4}$, la Diffusività di $3,5 \cdot 10^{-1}$ m²/s, la Permeabilità di $3,7 \cdot 10^{-4}$ cm/s.

5) Dalle caratteristiche geologico-strutturali esposte risulta evidente che l'acquifero è da ritenersi sufficientemente protetto da eventuali inquinamenti a causa della scarsa o nulla permeabilità dei terreni della formazione cambro-ordoviciana dell'Unità tettonica dell'Arburese.

Per quanto riguarda invece l'area di alimentazione a monte, l'assenza di attività agropastorali, industriali o di altre attività antropiche, insieme con l'abbondante vegetazione boschiva e la diffusa presenza della macchia mediterranea costituiscono indubbiamente fattori di piena garanzia per la salvaguardia delle proprietà organolettiche delle acque, come del resto documentano i trent'anni di produzione di acqua minerali da parte della locale società mineraria.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Carmignani, R. Carosi, A. Di Pisa, M. Gattiglio, G. Musumeci, G. Oggiano, P.C. Pertusati, *The Hercynian chain in Sardinia (Italy)*. Geodinamica Acte, 7, 31-47 (1994).
- [2] F. Leone, *La serie Paleozoica del settore di Orbai Monte Maiori (Valle del Cixerri – Sardegna Sud-Occidentale)*. Boll. Soc. Geol. It., 92 (1973), 621-633 (1973)
- [3] A. Pala, G. Pecorini, A. Porcu, S. Serra, *Geologia e idrogeologia del Campidano*. Ricerche Geotermiche in Sardegna, C.N.R., RF 10, 87-103 (1982).
- [4] F. Leone, W. Hamman, R. Laske, E. Serpagli, E. Villas, *Lithostratigraphic units and biostratigraphy of the post-sardic Ordovician sequence in south-west Sardinia*. Boll. Soc. Paleont. Ital., 30, 2, 201-235 (1991).
- [5] C.E. Jacob, *On flow water in an elastic artesian aquifer*. Trans. Amer Geoph Union, 2(1940).
- [6] M. Santoro, *Sulla applicabilità della formula di Turc per il calcolo dell'evapotraspirazione effettiva in Sicilia*. Atti del Conv. Intern. Acque Sott., I.A.H., Palermo (1970).