

Studio idrogeologico dell'acquifero del Luco (Toscana, Italia)

Fausto Capacci, Jenny Migliorini, Piero Barazzuoli

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena, capacci10@unisi.it, migliorini5@unisi.it, barazzuoli@unisi.it

Hydrogeological study of Luco aquifer (Tuscany, Italy)

ABSTRACT: This article illustrates the results of a preliminary hydrological study carried out in central southern Tuscany, in a part of the province of Siena. This study has become necessary because the existing aquifer (known as Luco) is considered of strategic importance for drinking water purposes and it is currently exploited by extracting approximately $8 \div 10 \cdot 10^6$ m³ of water per year. For this purpose, several types of data have been analyzed (stratigraphies, boreholes, V.E.S., groundwater level monitoring, hydrodynamic data and some hydrogeochemical data) permitting the creation of thematic maps, such as isopiestic line, isobath and iso-conductivity maps. The aquifer is to be found within the Breccia of Grotti Formation (Miocene), it has an average saturated thickness of approximately 95 m and a volume of about $5.8 \cdot 10^9$ m³. Giving an effective porosity of $5 \div 10\%$, it can be estimated that the aquifer contains a quantity of water of approximately $350 \div 700 \cdot 10^6$ m³. The results have allowed the definition of a first conceptual model of the aquifer and an estimate of the renewable resource at $27.6 \cdot 10^6$ m³ per year. At the same time, they have revealed the need to increase water wells in order to define, with greater precision, the trend of the piezometric surface, as well of the need for further hydrodynamic evaluation and a more detailed stratigraphic knowledge of the lesser investigated areas of the aquifer, especially those to the south and near its boundaries.

Key terms: Aquifer, Resource, Reserve, Luco

Termini chiave: Acquifero, Risorsa, Riserva, Luco

Riassunto

Questo articolo riporta i risultati di uno studio idrogeologico preliminare effettuato nella Toscana centro meridionale, in una porzione della Provincia di Siena. Lo studio si è reso necessario in quanto l'acquifero presente (denominato Luco) è considerato di importanza strategica ai fini idropotabili ed è attualmente sfruttato con un prelievo di circa $8 \div 10 \cdot 10^6$ m³/a.

A tal fine sono state analizzate ed interpretate varie tipologie di dati (stratigrafie, sondaggi, S.E.V., campagne piezometriche, dati idrodinamici e alcuni dati idrogeochimici), che hanno permesso l'elaborazione di cartografie tematiche: isopiezometriche, isobate e isoconduttive.

L'acquifero, che è ospitato all'interno della Formazione della Breccia di Grotti (Miocene), presenta uno spessore saturo medio di circa 95 m e un volume di circa $5.8 \cdot 10^9$ m³. Attribuendo una porosità efficace del $5 \div 10\%$ si può stimare che nell'acquifero si trovi immagazzinato un volume d'acqua pari a circa $350 \div 700 \cdot 10^6$ m³.

I risultati hanno consentito di definire un primo modello concettuale dell'acquifero e una stima della risorsa rinnovabile pari a $27,6 \cdot 10^6$ m³/a. Allo stesso tempo, hanno evidenziato la necessità di incrementare i punti d'acqua per definire più accuratamente l'andamento

della superficie piezometrica, nonché ulteriori valutazioni idrodinamiche ed una migliore conoscenza stratigrafica nelle zone ancora poco indagate dell'acquifero soprattutto nella parte sud ed ai suoi limiti.

1 – Introduzione

L'area oggetto di indagine (Figure 1 e 2) è il territorio compreso tra la Montagnola Senese, Pian del Lago e l'abitato di Monteriggioni ed è nota perché ospita "l'acquifero del Luco". Dal punto di vista idrografico, esso può essere suddiviso in una parte nord – occidentale, ricadente nel Bacino del F. Elsa (affluente di sinistra dell'Arno), e in una parte sud – orientale, compresa nel Bacino del F. Merse (affluente di destra dell'Ombro). Gli studi si sono inizialmente spinti oltre tali limiti (fino ad interessare una superficie superiore ai 350 km² all'interno della Provincia di Siena) attraverso l'acquisizione di adeguate conoscenze a livello «regionale» sull'assetto geologico ed idrogeologico e sulle caratteristiche idroclimatiche.

2 – Inquadramento geologico – strutturale e geometria dell'acquifero

L'area di studio corrisponde ad un settore del Bacino dell'Elsa e del Merse dove affiorano, al di sopra di forma-

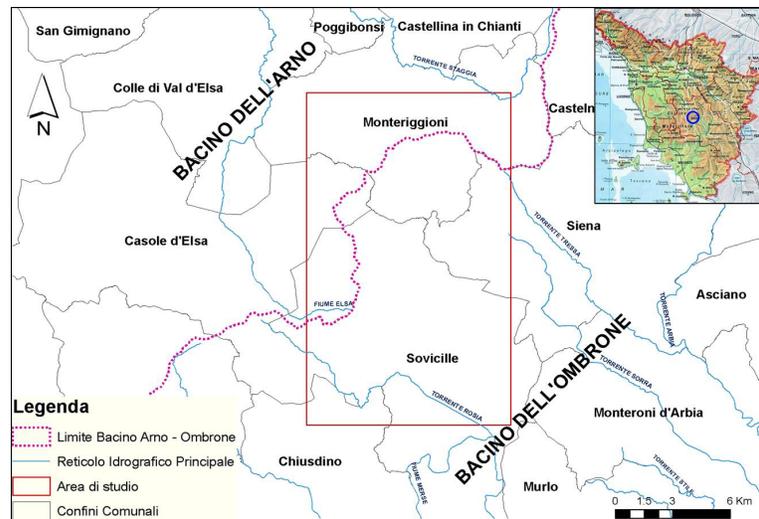


Figura 1: Inquadramento geografico dell'area di studio
 Figure 1: Map of the area of study

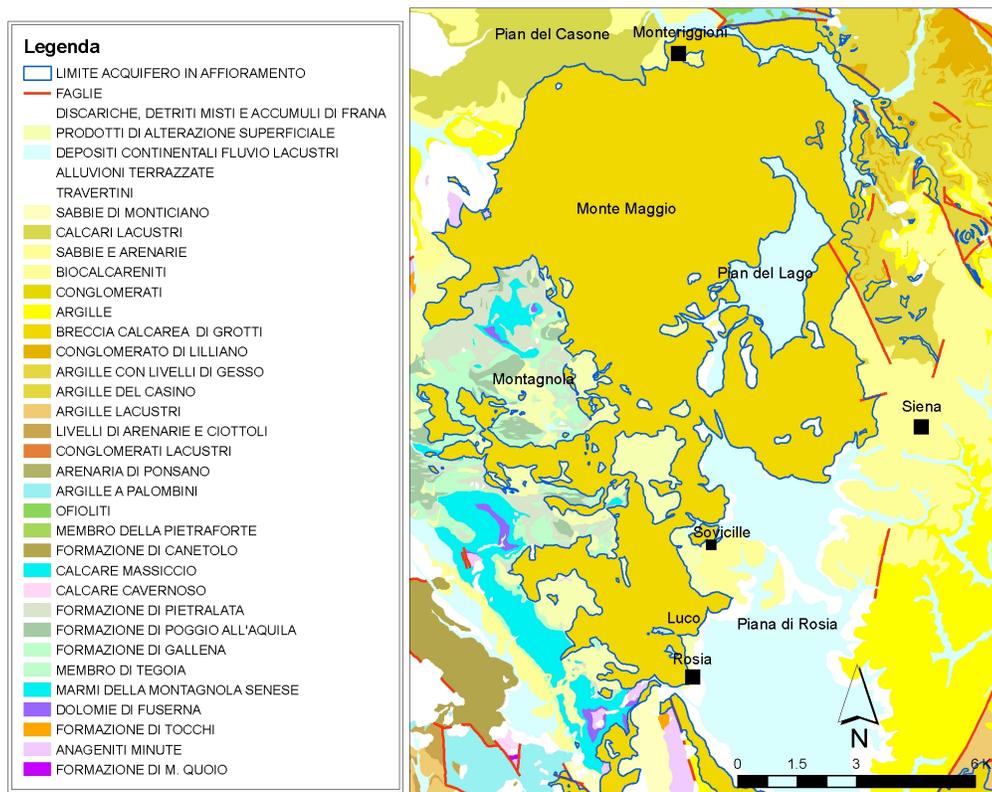


Figura 2: Inquadramento geologico dell'area di studio (Carta Geologica 1:25000 Provincia di Siena, 1999)
 Figure 2: Geological map of the area of study (Geological Map 1:25.000 Province of Siena, 1999)

zioni del Dominio toscano e del Dominio ligure, unità neogeniche di ambiente marino e continentale.

L'insieme dei dati raccolti consente di affermare che la zona in esame è caratterizzata dalla presenza di un acquifero ospitato all'interno della Formazione della

Breccia di Grotti - Miocene superiore (Figura 3). Questa fa parte del Complesso Neautoctono (ambiente continentale) e si presenta sotto forma di breccie e conglomerati monogenici, localmente stratificati in modo grossolano, ad elementi risedimentati di dimensioni

variabili da 2 a 30 cm provenienti per la maggior parte dalla Formazione del Calcere Cavernoso e subordinatamente da Marmi o da Calcari selciferi metamorfici. Il Calcere Cavernoso (Triassico Superiore) è costituito da calcari brecciati, calcari dolomitici, calcari cariati e vacuolari, derivanti dalla serie anidritica - dolomitico triassica (Formazione anidritica di Burano) e si è formato in seguito a processi di idratazione - disidratazione superficiale. I clasti della Breccia di Grotti consistono in blocchi e subordinati ciottoli di calcare in matrice sabbiosa e sabbioso limosa calcarea di colore giallo - arancio e rosso ruggine per processi pedogenetici. Tutto questo porta il complesso a possedere una permeabilità primaria per porosità ed una secondaria per fessurazione che può essere esaltata da locali fenomeni carsici in corrispondenza dei vacuoli.



Figura 3: Breccia di Grotti: la roccia serbatoio
 Figure 3: Breccia of Grotti: water reservoir rock

In definitiva, l'acquifero in studio presenta una permeabilità mista per porosità e fessurazione.

La natura complessa della Breccia di Grotti, in relazione alle formazioni con cui è a contatto, fa sì che l'acquifero in studio venga ad assumere rapporti idrodinamici diversi, spostandosi dalla Montagnola Senese verso E, che si manifestano con variazione delle relative condizioni ai limiti. In particolare, dove affiora la Breccia di Grotti, Figure 2 e 4, essa va a costituire un acquifero a falda libera. In questo caso, il limite superiore della falda è un limite idrodinamico rappresentato dalla superficie piezometrica. Verso E, invece, l'acquifero risulta a falda semiconfinata, in virtù di un limite superiore costituito da formazioni idrogeologiche semipermeabili (litotipi argillosi e sabbioso - limosi). Procedendo ancora verso E, la Breccia di Grotti è superiormente limitata dal contatto diretto con le argille

del Pliocene (Argille azzurre), scarsamente permeabili, che la separano dal sovrastante acquifero secondario semipermeabile; in questo caso l'acquifero risulta ovviamente a falda confinata.

Tali argille plioceniche, assieme a quelle mioceniche (Argille del Casino), confinano anche lateralmente l'acquifero principale lungo quasi tutto il suo perimetro. Difatti solamente lungo il margine N dell'affioramento della Breccia di Grotti, esiste un probabile limite idraulicamente aperto verso i Travertini e i Calcari continentali lacustri di Pian del Casone, nel Comune di Monteriggioni.

La base dell'acquifero, e quindi il suo limite inferiore, è individuabile dal contatto, nella parte occidentale, con le Formazioni metamorfiche del Dominio Toscano (Successione mesozoica e terziaria della Montagnola Senese) e dal Verrucano triassico, nella parte sud - orientale, con i sedimenti flyschoidi delle Unità Liguri e dalla Formazione della Verruca. La profondità di tali formazioni, considerate un impermeabile relativo rispetto alla formazione idrogeologica permeabile corrispondente alla Breccia di Grotti, non sono state definite con sicurezza per le poche informazioni dirette (stratigrafie) ed indirette (indagini geofisiche) disponibili. Si è cercato, comunque, di ricostruire l'andamento del substrato relativamente al settore centrale della zona studiata nella quale la Breccia di Grotti sovrasta le formazioni del Gruppo calcareo-siliceo della Montagnola Senese.

Le valutazioni precedentemente esposte, consentono di pervenire ad una stima approssimativa degli spessori saturi nel settore nord dell'acquifero; questo fatto assume particolare importanza per poter valutare, oltre alla risorsa rinnovabile dell'acquifero, anche la riserva regolatrice e/o permanente la cui presenza e la cui entità sono di fondamentale importanza sia per definire la capacità regolatrice dell'acquifero, sia per progettare un razionale utilizzo della risorsa medesima (Castany, 1968; Celico, 1988 Vol. II).

Tabella 1: Quota del tetto della breccia di Grotti desunto sia da S.E.V. che da stratigrafie

Table 1: Height of the top of the Breccia di Grotti, obtained by means of both V.E.S. and stratigraphies.

| Codice | Toponimo | Quota tetto (m s.l.m.) |
|--------|------------------|------------------------|
| 1 | Campi Pozzuolo | -100,0 |
| 2 | Bantitone | -37,5 |
| 3 | Campi Malignano | -62,5 |
| 4 | Il Pantaccio | -150,0 |
| 5 | Malignano | 125,0 |
| 6 | Loccaia | -250,0 |
| 7 | Pieve | -80,0 |
| 8 | La Grotta | -137,5 |
| 9 | Le Volte Basse | 162,5 |
| 10 | Certano | 50,0 |
| 11 | S. Rocco a Pilli | -140,0 |
| 12 | Linari | -170,0 |

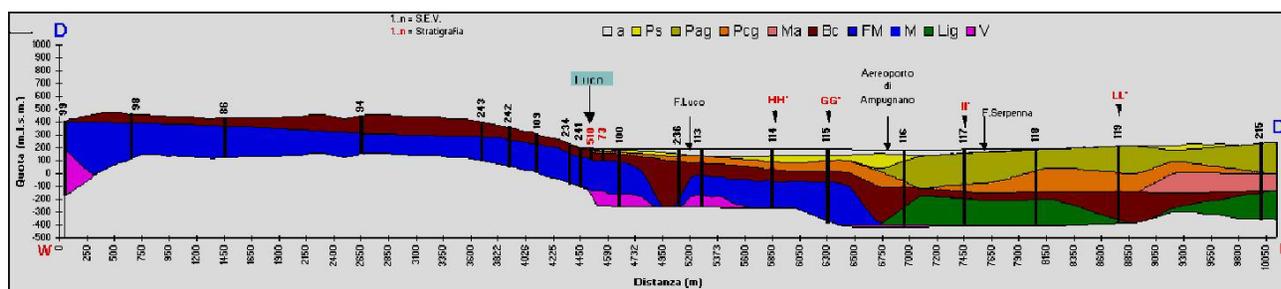


Figura 4: Sezione litostratigrafica dal modello digitale tridimensionale multistrato (Cucini, 1997) - a: Depositi alluvionali; Ps: Sabbie limose; Pag: Argille limose; Pcg: Conglomerati sabbiosi; Ma: Argille; Bc: Breccia calcarea; FM + M: F. calcareo silicee metamorfiche + Marmi montagnola; Lig: Liguridi; V: Verrucano

Figure 4: Lithostratigraphic cross-section from the digital three-dimensional multilayer model (Cucini, 1997) - a: Alluvial deposits; Ps: Loamy sand; Pag: Loamy clay; Pcg: Sandy conglomerates; Ma: Clay; Bc: calcareous Breccia of Grotti; Fm + M: F calcareous siliceous metamorphic + "Montagnola" marble; Lig: Ligurides; V: Verrucano

3 – Caratteristiche idrodinamiche dell’acquifero

L’insieme dei dati raccolti ed elaborati (stratigrafie, sondaggi, S.E.V., campagne piezometriche, dati idrodinamici e alcuni dati idrogeochimici) consentono di affermare che la zona in studio è caratterizzata dalla presenza di un acquifero di importanza strategica, all’interno dalla Formazione della Breccia di Grotti (Miocene) che contiene una rilevante falda di base che satura il complesso carbonatico almeno fino alla quota di 185-190 m s.l.m.. Questa è caratterizzata da una scarsa variabilità della superficie piezometrica nel corso dei periodi indagati (misure discontinue negli anni 1996 – 1997 e 1999), pur in presenza di periodi con differenze di

apporto meteorico e di prelievo dell’acqua sotterranea per vari usi, denotandone così l’importante potenzialità idrica.

La falda presenta (Tabella 2) una zona di alto piezometrico, con valori di 190÷192 m s.l.m., nel settore NE dell’area di studio che contrassegna la zona nelle vicinanze di M. Maggio come la principale area di ricarica idrica dell’acquifero (Figura 5).

A partire da questa zona, le acque sotterranee defluiscono quasi radialmente, in particolare verso il bacino dell’Elsa a N e verso quello del Merse a S.

Gli unici dati reperibili riguardo la trasmissività dell’acquifero sono risultati pari a $0,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ nella zona di Pian del Lago e a ca. $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ nella zona del Luco.

Tabella 2: Elenco dei pozzi, loro ubicazione e livelli piezometrici medi misurati durante le campagne di rilevamento (1996 – 1997 e 1999)

Table 2: List of wells, their position and average piezometric levels measured during the monitoring surveys (1996 – 1997 and 1999)

| Codice | Coordinate Gauss Boaga | | Ubicazione | Quota m (s.l.m.) | Livello Piezometrico m (s.l.m.) | Profondità del Pozzo (m) |
|--------|------------------------|---------|------------------|---------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| | EST | NORD | | | | |
| 1 | 1680241 | 4791481 | Loc.Barbicciaia | 231.66 | 192.69 | 100 |
| 2 | 1681031 | 4793942 | Pod.Crocino | 255.00 | 185.00 | 103 |
| 3 | 1681782 | 4792914 | Loc.Sparavicchio | 200.05 | 186.00 | 43 |
| 4 | 1681768 | 4790567 | Treggiaia | 188.92 | 186.92 | 34 |
| 5 | 1680663 | 4791310 | Casetta | 193.66 | 184.66 | 110 |
| 6 | 1685168 | 4793012 | Loc.Agresto | 206.02 | 175.02 | 52 |
| 7 | 1680932 | 4788451 | Pod.La Rancia | 238.54 | 199.34 | 70 |
| 8 | 1680737 | 4791936 | Loc.Luco | 193.95 | 187.65 | 60 |
| 9 | 1682055 | 4801429 | Caggio | 280.47 | 192.17 | 23 |
| 10 | 1681254 | 4795137 | San Giusto | 229.34 | 184.34 | 72 |
| 11 | 1681556 | 4792050 | Casanuova | 189.72 | 185.12 | 82 |
| 12 | 1680904 | 4790381 | Macinaoli | 195.32 | 180.32 | 60 |
| 13 | 1682714 | 4806352 | Casalino Badesse | 243.01 | 183.01 | 65 |
| 14 | 1679005 | 4805794 | Valmaggione | 196.40 | 185.28 | 18 |
| 15 | 1683257 | 4801817 | Pian del Lago | 262.78 | 184.78 | 170 |
| 16 | 1681136 | 4794364 | Casanuova | 224.18 | 185.18 | 47 |
| 17 | 1684047 | 4787348 | M.no Del Palazzo | 184.78 | 179.78 | 65 |
| 18 | 1684581 | 4796064 | Ferratore | 227.53 | 192.53 | 54 |
| 19 | 1676576 | 4805519 | Monteriggioni | 247.60 | 184.35 | ~ |
| 20 | 1675673 | 4802859 | Monteriggioni | 297.61 | 183.91 | ~ |
| 21 | 1674951 | 4801241 | Casole d'Elsa | 320.00 | 184.90 | ~ |

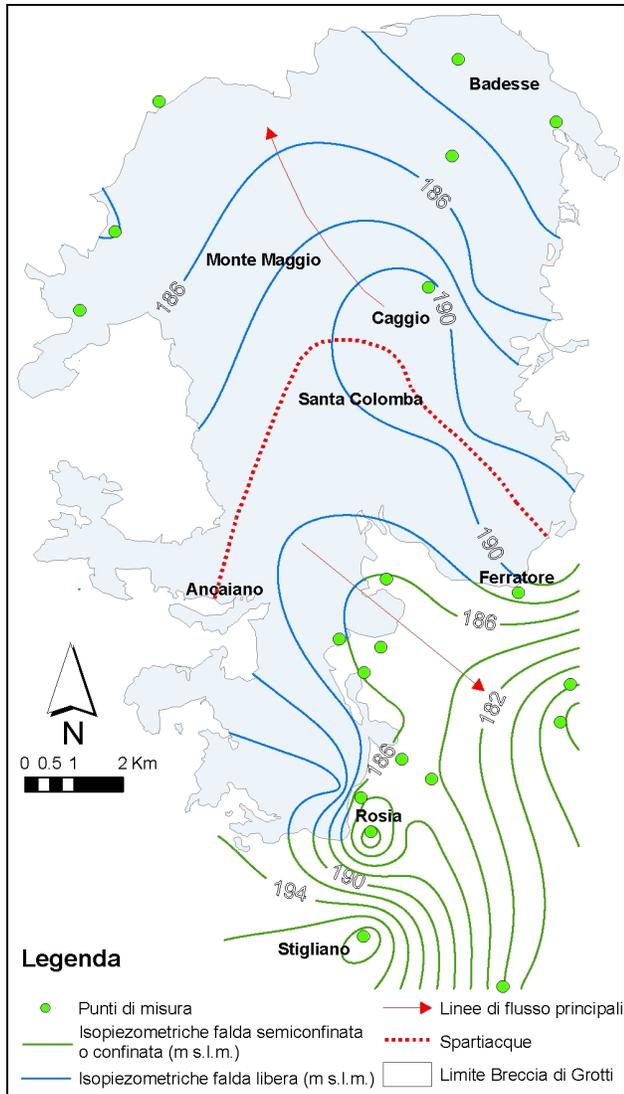


Figura 5: Carta delle Isopieze dell'acquifero del Luco
 Figure 5; *Isopiestic line map of Luco aquifer*

Questi valori sono sensibilmente diversi tra loro, ma il fatto è piuttosto comune in acquiferi dove la distribuzione spaziale della porosità, dello spessore saturo e della permeabilità varia normalmente da un settore all'altro, pur rimanendo, queste, entro valori quasi sempre assai favorevoli allo sfruttamento idrico tramite pozzi. Comunque sia, una valutazione attendibile dei principali parametri idrodinamici dell'acquifero non può prescindere dalla locale perforazione di pozzi pilota ed esecuzione di adeguate prove di pompaggio e/o con traccianti.

4 – Analisi chimiche

All'interno di questo studio sono state effettuate delle analisi chimiche e delle misure di conducibilità elettrica dell'acqua di falda (1996 – 1997 e 1999) che hanno

permesso di esaminare i principali parametri idrogeochimici.

I valori medi di conducibilità elettrica (Tabella 3) sono minori nel settore centrale dell'affioramento della Breccia di Grotti dove presentano valori dell'ordine di 450÷550 microS/cm (e quindi con una salinità pari a circa 300÷400 mg/l) e tendono ad aumentare in modo radiale raggiungendo i 700 microS/cm (circa 500 mg/l) nella zona di Pian del Lago e del Luco ed i 1100 – 1200 microS/cm (circa 750 mg/l) nelle estremità NE e N.

La distribuzione della conducibilità elettrica (Figura 6) in relazione ai livelli piezometrici della falda, conferma l'anzidetta ricostruzione del campo di moto delle locali acque sotterranee nel quale appare evidente che l'alimentazione dell'acquifero è dovuta alle sole precipitazioni e che le principali linee di flusso dell'acqua di falda si originano nel settore centrale e si allontanano all'incirca in senso radiale dal massiccio carbonatico di M. Maggio arricchendosi via via di sali.

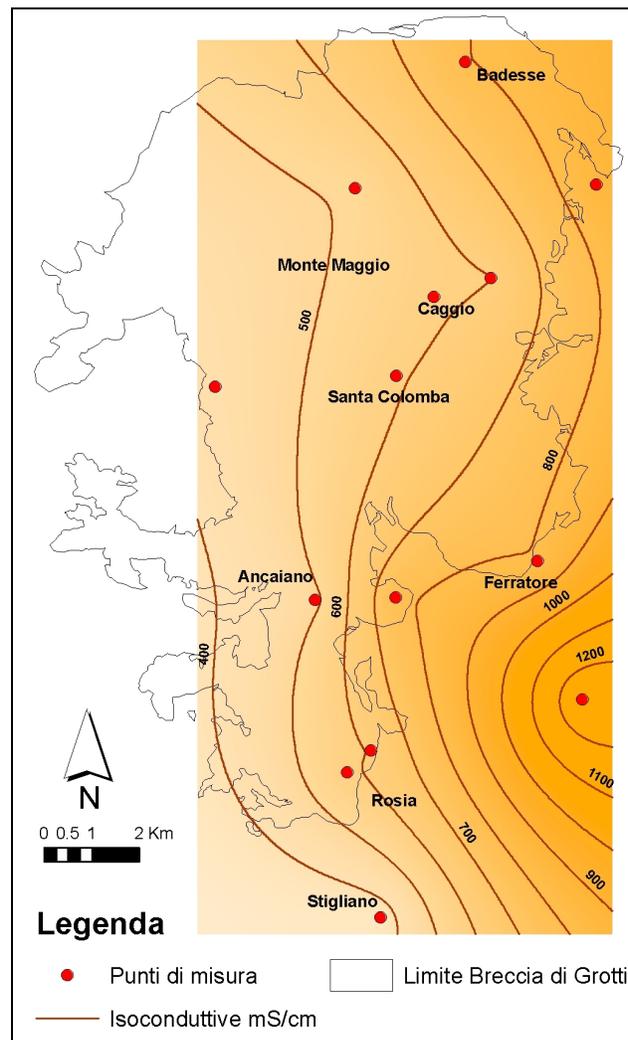


Figura 6: Carta delle Isoconduttive dell'acquifero del Luco
 Figure 6: *Iso-conductivity map of the Luco aquifer*

La durezza varia dai 28÷35 °F nella zona centrale ed aumenta radialmente fino ai 45 °F del Luco ed ai 45÷55 °F ai confini settentrionali dell'affioramento.

Tabella 3: Elenco dei pozzi, loro ubicazione e valori medi di conducibilità elettrica

Table 3: List of wells, their position and average piezometric values of electrical conductivity

| Coordinate Gauss Boaga | | Ubicazione | Conducibilità Elett. μS/cm a 20°C |
|------------------------|---------|------------------|--------------------------------------|
| EST | NORD | | |
| 1677472 | 4799544 | Loc. Cerrecchio | 431 |
| 1679570 | 4795092 | Treccianino | 482 |
| 1680241 | 4791481 | Rosia | 594 |
| 1680401 | 4803700 | Fioreta | 514 |
| 1680737 | 4791936 | Loc.Luco | 605 |
| 1680932 | 4788451 | Pod.La Rancia | 356 |
| 1681254 | 4795137 | San Giusto | 781 |
| 1681268 | 4799779 | Loc. Casale | 590 |
| 1682055 | 4801429 | Caggio | 588 |
| 1682714 | 4806352 | Casalino Badesse | 795 |
| 1683254 | 4801827 | Pian del Lago | 599 |
| 1684222 | 4795902 | Ferratore | 810 |
| 1685168 | 4793012 | Loc.Agresto | 1290 |
| 1685460 | 4803780 | Corpo Santo | 866 |

Il chimismo delle acque analizzate (18 campioni) riflette prevalentemente il tipo composizionale delle acque bicarbonato-alcalino terrose (Figura 7).

I processi genetici di queste acque sono principalmente legati ad una prevalente lisciviazione di

formazioni calcaree alla quale si sovrappone, in modo nettamente secondario, quella derivante dal contatto con terreni evaporatici; ciò è in buon accordo con quanto conosciuto sulle caratteristiche litologiche della formazione della Breccia di Grotti che è sostanzialmente costituita da elementi di calcari dolomitici con possibili clasti gessosi derivanti dai livelli originari del "Calcare Cavernoso".

E' anche da sottolineare che i campioni di acqua prelevati da pozzi ubicati nei calcari lacustri e nelle sabbie plioceniche che sono a diretto contatto con l'acquifero in questione, presentano sostanzialmente lo stesso chimismo, consentendo di ipotizzare possibili passaggi idrici in uscita attraverso i limiti dell'acquifero.

Inoltre sono presenti un campione di acqua solfato-alcalino terrosa la cui genesi è principalmente legata ad un prevalente dilavamento di terreni anidritici al quale si sovrappone quello derivante dal contatto con terreni calcarei e un campione di acqua clorurato-alcalina i cui processi genetici, allo stato attuale delle conoscenze, sono difficilmente spiegabili (potrebbe trattarsi di inquinamenti locali di tipo "geotermico" che affiorano in numerose manifestazioni sorgentizie poco al di fuori dell'acquifero in oggetto).

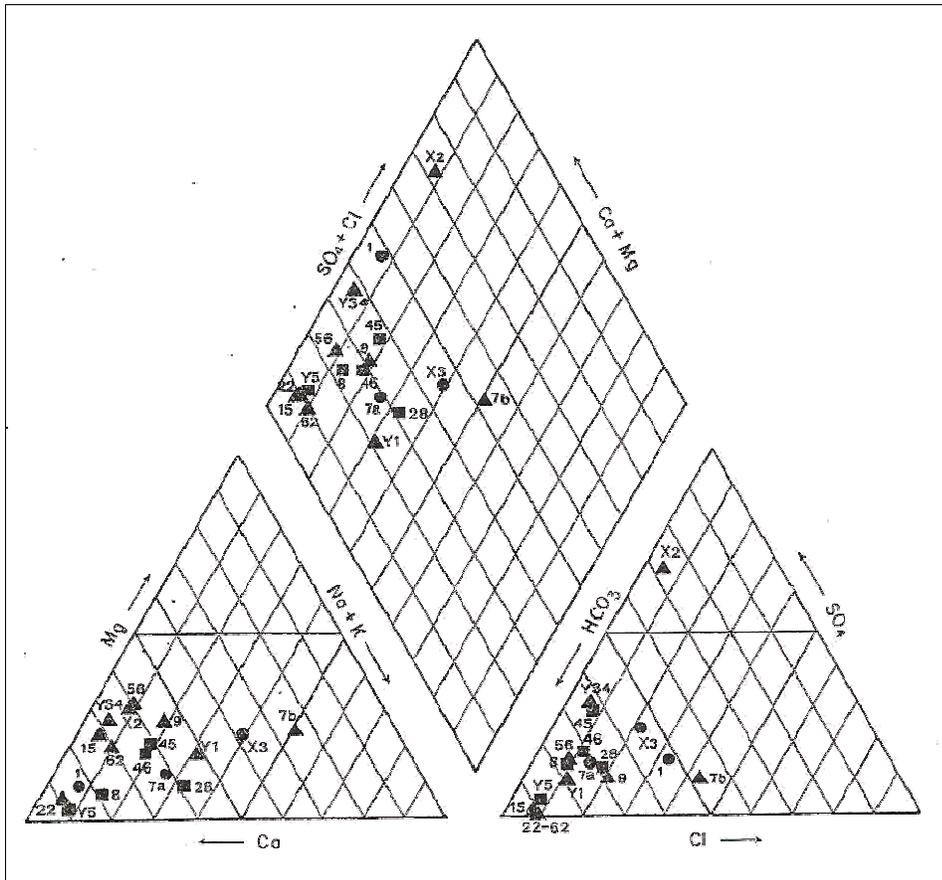


Figura 7: Diagramma di Piper per i punti d'acqua analizzati; i simboli utilizzati rappresentano le formazioni sulle quali sono ubicati i vari punti d'acqua: cerchi = sabbie e conglomerati marini (Pliocene); quadrati = calcari lacustri (Pleistocene); triangoli = Breccia di Grotti (Miocene sup.).

Figure 7: Piper diagram of the water wells analyzed; the symbols used represent the formations where the various water wells are located: circles = sand and marine conglomerates (Pliocene; squares = lacustrine limestones (Pleistocene); triangles = Breccia of Grotti (Upper Miocene)

5 – Potenzialità idrica dell'acquifero: risorse e riserve

Nonostante la grande importanza che assume la conoscenza dei quantitativi d'acqua disponibili in un determinato ambito territoriale al fine di una corretta utilizzazione del patrimonio idrico, si deve purtroppo rilevare un certo grado di incertezza che ancora sussiste riguardo la risorsa razionalmente estraibile dall'acquifero ospitato nella Breccia di Grotti tra gli abitati di Monteriggioni e Rosia il quale, per quantità e qualità, è uno dei più importanti serbatoi naturali della Toscana meridionale. A tale scopo, sono certamente da preferirsi le valutazioni basate su misure periodiche e di lungo periodo del deflusso sotterraneo in uscita dall'acquifero; infatti dato che l'entità della risorsa disponibile è variabile nel tempo (in funzione soprattutto dell'andamento climatico), misure discontinue o riferite a non lunghi intervalli temporali, come in questo caso, conducono a stime che hanno validità in relazione al periodo cui si riferiscono, ma non sono utilizzabili per previsioni future.

In relazione all'acquifero indagato, che non presenta al suo interno emergenze sorgentizie evidenti e misurabili (sorgenti limitrofe all'area di affioramento, come ad esempio le Vene di Onci, non emergono direttamente dalla Breccia di Grotti ed infatti erogano acque le cui caratteristiche chimico-fisiche sono tali da essere correlate a circuiti profondi "sub termali" in formazioni geologiche molto ricche di solfati come le Anidridi di Burano ed il Calcare Cavernoso (Barazzuoli *et alii*, 1987), data la disponibilità di poche misure storiche e discontinue di livelli piezometrici (anni 1996 – 1997 e 1999) risulta difficile stimare, attraverso l'analisi dell'escursione di tali livelli stagionali e/o del loro "esaurimento", valori attendibili sull'entità media della risorsa idrica. Si è perciò dovuti ricorrere a valutazioni indirette le quali, seppur generalmente meno precise delle precedenti, forniscono risultati comunque affidabili e di buona validità statistica e possono essere utilizzati per definire le leggi della variabilità temporale della risorsa e per previsioni circa l'entità disponibile a breve – medio termine; ben si capisce che questi ultimi aspetti sono estremamente importanti per un corretto e pianificato sfruttamento delle risorse (*infatti, si pianifica per l'uso futuro della risorsa ed i dati storici sono utili solo se permettono di valutare la risorsa di domani*).

Non potendo quindi valutare in maniera statisticamente attendibile il deflusso medio sotterraneo (Q_s) e considerato che l'acquifero in oggetto, per la sua particolare struttura idrogeologica, risulta alimentato pressoché esclusivamente dall'infiltrazione meteorica, frazione delle precipitazioni efficaci (o *eccedenza idrica*), si è proceduto, relativamente all'area di affioramento della Breccia di Grotti, a valutare l'infiltrazione (I_t), nelle zone di alimentazione (infatti l'equazione del bilancio idrogeologico di un acquifero $I_t=Q_s$, fa corrispondere

queste due quantità). Con questi presupposti la risorsa idrica rinnovabile dell'acquifero risulta corrispondere (in regime naturale e su lungo periodo) all'infiltrazione totale (I_t) relativa all'affioramento della roccia serbatoio. Per valutare tale parametro si è fatto ricorso a calcoli di bilancio. Andando a valutare i valori medi annui dei relativi parametri, con riferimento al periodo 1967 – 1996 (precipitazioni P , evapotraspirazione reale E_r ed eccedenza idrica W_s), a questo punto, l'entità dell'infiltrazione media annua I_t (e, di conseguenza, quella della risorsa rinnovabile) è stata ricavata attraverso l'uso dei cosiddetti *coefficienti di infiltrazione potenziale* (c.i.p.) (Celico, 1988).

Tale procedura consiste nel valutare l'infiltrazione media annua come porzione, variabile soprattutto in funzione del tipo litologico costituente l'area di alimentazione dell'acquifero (e quindi del suo grado di permeabilità relativa), della corrispondente eccedenza idrica. Per l'area di alimentazione dell'acquifero in oggetto, costituita da roccia carbonatica dotata di un elevato grado di permeabilità, si è ipotizzato che la quota di infiltrazione corrispondesse mediamente a circa il 90 % del W_s (Celico, 1988, Vol. II), vale a dire:

$$I_t = W_s \cdot \text{c.i.p.}$$

$$I_t = W_s \cdot 0,90$$

A questo scopo, è stato effettuato il calcolo del $W_s = P - E_r$ (E_r calcolata secondo Thornthwaite & Mather, 1957) in tutte le stazioni pluviometriche della zona in esame, arrivando poi a definire l'andamento spaziale di questo parametro attraverso la costruzione delle tre carte tematiche (Figure 8, 9 e 10), dalle quali si è potuto ricavare il valore del W_s relativo all'intera area di alimentazione dell'acquifero in esame (circa 111 km²) che è risultato pari a 277 mm/anno. Sulla base di questo valore medio, e tramite la metodologia suddetta, è stato definito il valore medio annuo dell'infiltrazione (I_t) e quindi della ricarica:

$$I_t = 277 \cdot 0,90 = 249 \text{ mm/anno}$$

il quale, in funzione dell'estensione dell'area di alimentazione, definisce un volume idrico di ricarica (I_t) pari a:

$$I_t = 0,249 \text{ m/anno} \cdot 111 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \approx 27,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$$

che corrispondono ad una portata media di circa 870 l/s (Tabella 5).

Ciò significa che, in termini di sfruttamento razionale, dall'acquifero in oggetto può essere mediamente emunta una portata complessiva non superiore a ca. 0,8 m³/s senza che il sistema idrogeologico ne risulti sensibilmente alterato.

Sempre con relazione all'utilizzo delle risorse, si era già rilevato che l'acquifero, nella sua parte nord, alimenta con discrete quantità di acqua un'altra falda ospitata nei calcari lacustri di Pian del Casone, che è attualmente sfruttata tramite pozzi per l'approvvigionamento dei Comuni limitrofi alla città di Siena.

Tabella 4 – Confronto tra le valutazioni della risorsa idrica rinnovabile (I_t)
 Table 4: Comparison between the evolutions of the renewable water resource (I_t)

| Acquifero | W_s (mm/a) | c.i.p | I_t (mm/a) | Sup. alim. (km ²) | I_t (10 ⁶ m ³ /a) |
|----------------|-----------------|-------|-----------------|----------------------------------|--|
| Acquifero nord | 277 | 0,9 | 249 | 74 | 18,4 |
| Acquifero sud | 277 | 0,9 | 249 | 37 | 9,2 |

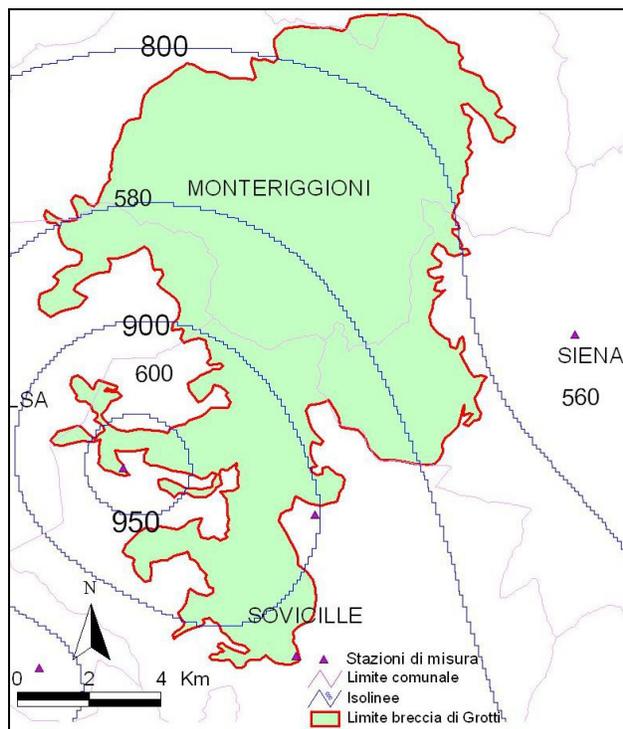


Figura 8: Carta degli Afflussi (mm)
 Figure 8: Map of Precipitations (mm)

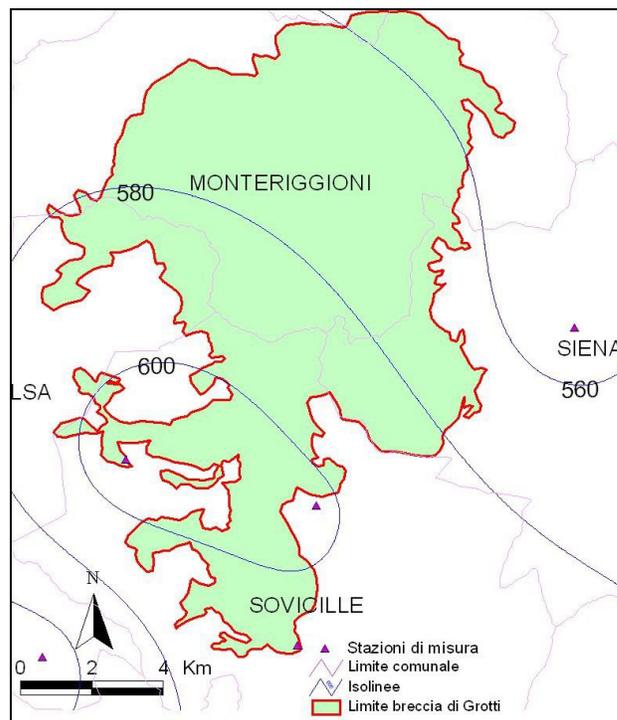


Figura 9: Carta dell'Evapotraspirazione (mm)
 Figure 9: Map of Evapotranspiration (mm)

Tabella 5 – Variabilità statistica dei valori della risorsa idrica rinnovabile (I_t), in relazione all'intera area di alimentazione dell'acquifero contenuto nella Breccia di Grotti.

Table 5: Statistical variances of the values of the renewable water resource (I_t), in relation to the whole recharge area of the aquifer container in the Breccia of Grotti

| | | W_s (mm/anno) | c.i.p. | I_t (mm/anno) | Sup.alim. (km ²) | I_t (10 ⁶ m ³ /anno) | I_t (l/s) |
|---|-------|--------------------|--------|--------------------|---------------------------------|---|----------------|
| Valore medio | Media | 277 | 0,9 | 249 | 111,0 | 27,6 | 876 |
| | CV | 0,22 | | | | | |
| | SQM | 61 | | | | | |
| Range del valore atteso con la probabilità del 66 % | max | 338 | 0,9 | 304 | 111,0 | 33,7 | 1070 |
| | min | 216 | 0,9 | 194 | 111,0 | 21,5 | 682 |
| Range del valore atteso con la probabilità del 99 % | max | 460 | 0,9 | 414 | 111,0 | 46,0 | 1457 |
| | min | 94 | 0,9 | 85 | 111,0 | 9,4 | 298 |

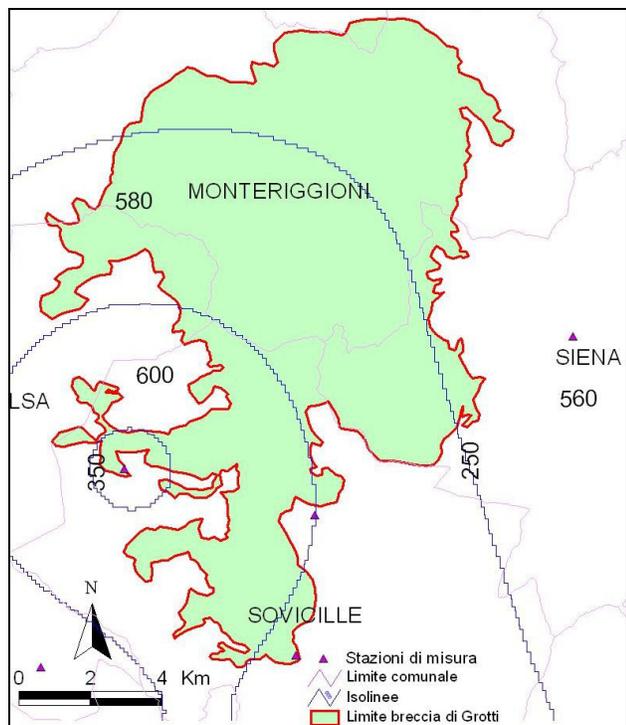


Figura 10: Carta dell'Eccedenza Idrica (W_s) in mm
 Figure 10: Map of Water Surplus (W_s) in mm

Questi quantitativi di scambio idrico (non trascurabili) non sono valutabili in modo attendibile a causa della carenza dei dati necessari alla corretta definizione della velocità effettiva dell'acqua di falda e dei rapporti geometrici tra i due acquiferi nella zona di contatto.

Nella Tabella 4 sono riportati i risultati delle elaborazioni relative alla valutazione della risorsa idrica rinnovabile relativamente al settore settentrionale e a quello meridionale dell'acquifero.

Ovviamente, per questi valori valgono le stesse considerazioni viste in precedenza sulla variabilità statistica della risorsa e sui quantitativi tendenziali; considerando un *trend* negativo del 10 – 15% (A.A.T.O. 6 1998), nel prossimo futuro è lecito attendersi valori medi della risorsa nel settore N pari a circa $16 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (circa 500 l/s).

Inoltre è stata stimata l'entità delle riserve idriche permanenti in relazione al solo settore settentrionale dell'acquifero, all'incirca a N di S. Colomba in quanto i dati stratigrafici sono presenti quasi esclusivamente su questa porzione di acquifero.

Considerato uno spessore medio dell'acquifero di 95 m, moltiplicando questo per l'estensione della zona considerata (pari a circa 74 km^2), porta a ricavare un volume di acquifero saturo di ca. $7 \cdot 10^9 \text{ m}^3$; il quantitativo d'acqua immagazzinato è adesso ricavabile dal prodotto tra detto volume e la porosità efficace dell'acquifero stesso. Riguardo quest'ultimo parametro, non erano disponibili adeguate conoscenze raccolte attraverso misure dirette (né si sono potute effettuare); è comunque probabile che esso presenti valori simili ad altri acquiferi dello stesso tipo per i quali si ritrovano in letteratura porosità efficaci dell'ordine del 5÷10 %. Di conseguenza, si può così stimare che nell'acquifero in esame si trova mediamente immagazzinato un volume d'acqua pari a circa $350\text{--}700 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, che comunque sia è notevolmente maggiore (circa 20÷40 volte) di quanto stimato per le risorse rinnovabili; esso consentirebbe, se confermato da studi successivi (mirati alla individuazione della base dell'acquifero e del suo spessore) una corretta stima delle riserve permanenti e quindi uno sfruttamento continuativo dell'acquifero sia in periodi secchi che umidi (*tuttavia, sempre entro i limiti dei valori medi delle risorse rinnovabili prevedibili per il prossimo futuro*).

Tabella 6 – Ipotesi fabbisogno idropotabile Area Metropolitana Senese (Barazzuoli *et alii*, 2004)

Table 6: Hypothesis of drinking water demand in the Urban Area of Siena (Barazzuoli *et alii*, 2004)

| Comune | Superficie (Km ²) | Popolazione Dati ISTAT 2001 | Fluttuanti | Tot. Inverno (mc) | Tot. Estate (mc) | Ipotesi fabbisogno Idropotabile | |
|----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|-------------------|---|---------------|
| | | | | | | Dotazione teorica Area Metropolitana (l/gg ab.) | |
| | | | | | | (10 ⁶ m ³ /anno) | l/s |
| ASCIANO | 215,78 | 6468 | 2603 | 368340,48 | 482343,12 | 0,85 | 26,98 |
| CASTELNUOVO BERARDENGA | 177,00 | 7417 | 534 | 422323,98 | 445720,19 | 0,87 | 27,53 |
| MONTERIGGIONI | 99,25 | 7877 | 1217 | 448516,38 | 501819,93 | 0,95 | 30,13 |
| MONTERONI D'ARBIA | 105,81 | 7161 | 953 | 407747,34 | 449496,10 | 0,86 | 27,18 |
| SIENA | 118,49 | 48844 | 11845 | 2781177,36 | 3299989,94 | 6,08 | 192,83 |
| SOVICILLE | 143,60 | 8346 | 2021 | 475221,24 | 563750,68 | 1,04 | 32,95 |
| TOTALI AREA METROPOLITANA | 859,93 | 86113 | 19174 | 4903326,78 | 5743119,95 | 10,65 | 337,60 |

6 – Variabilità delle risorse e disponibilità future

Quanto determinato in merito alla risorsa media annua è estremamente utile a livello pianificatorio, mentre l'utilizzo reale delle medesime, pur essendo correlabile a tale valore, deve però confrontarsi con la sua variabilità naturale. Il che significa, tradotto in termini di previsionalità statistica, come indica la teoria, che nel prossimo futuro i valori annui della ricarica, e quindi della risorsa, ricadranno, con la probabilità del 66 %, nel *range* media \pm SQM (scarto quadratico medio) e, con la probabilità del 99 %, nel *range* media \pm 3 volte SQM; quest'ultimo parametro, insieme al coefficiente di variazione (CV) che ne esprime il rapporto percentuale rispetto alla media, è l'indice della maggiore o minore variabilità temporale del parametro, e quindi dalla sua minore o maggiore capacità previsionale (Custodio, LLamas, 1983; Barazzuoli *et alii*, 2003, A.A.T.O. 6, 1998).

Nel caso in esame (Tabella 5), il CV ed lo SQM assumono, (come del resto fanno i parametri statistici delle serie idroclimatiche essendo esse delle variabili casuali), valori piuttosto elevati; ciò indica, appunto, la scarsa possibilità previsionale offerta, per tali fenomeni, dall'analisi statistica dei soli valori medi in quanto, per essere relativamente certi del *range* in cui cadranno i prossimi valori di ricarica, bisogna fare riferimento all'intervallo 298 – 1457 l/s.

Risulta evidente che i *range* di Tabella 5 (soprattutto quello corrispondente alla probabilità del 99 %) risultano troppo ampi per consentire corrette azioni pianificatorie nello sfruttamento futuro della risorsa; per questo occorre allora far riferimento ad analisi statistiche più sofisticate come, ad esempio, la *trend analysis* con la quale, sulla base delle serie storiche di un determinato parametro, è possibile ricavare indicazioni circa il valore medio tendenziale che esso probabilmente assumerà nel breve-medio termine. Una prima elaborazione effettuata in quest'area fornisce un *trend* negativo per la risorsa futura valutabile in circa -2,2 mm/anno; ciò significa, pur con la prudenza necessaria nella lettura di questo tipo di risultati, che nel prossimo futuro è lecito attendersi valori medi della risorsa inferiori di un 10÷15 % rispetto a quanto precedentemente calcolato (e quindi pari a $25\div 23,5 \cdot 10^6$ m³/anno, corrispondenti a circa 790÷740 l/s di ricarica

meteorica).

7 – Considerazioni conclusive

Le indagini svolte hanno portato ad individuare le caratteristiche geometriche, dinamiche ed idrogeochimiche principali dell'acquifero del Luco. Questo è collocato all'interno della Breccia di Grotti, ha un'estensione in affioramento di circa 111 km² che rappresenta l'area di alimentazione della falda con un volume di infiltrazione pari a ca. $27,6 \cdot 10^6$ m³/anno.

L'acquifero si presenta in parte libero ed in parte semiconfinato e/o confinato ed è idrogeologicamente suddivisibile in due porzioni aventi, rispettivamente, un flusso prevalente verso nord (74 km²) o verso sud (37 km²).

Per quanto riguarda lo sfruttamento della risorsa, l'acquifero meridionale risulta essere quello più utilizzato in quanto, come si può notare nella Tabella 6, i Comuni di Siena, Sovicille e Monteroni d'Arbia attingono acqua per la quasi totalità da questo serbatoio per un consumo totale di circa $8 \cdot 10^6$ m³/anno che sono comunque inferiori alla potenzialità di questa porzione di acquifero ($9,2 \cdot 10^6$ m³/anno di risorsa rinnovabile).

Geochemicalmente le acque di falda risultano di buona qualità (classificate come solfato – alcalino terrose) con caratteri chimici perfettamente rispondenti a quanto stabilito dalla normativa vigente per il consumo umano (D.L. 152/2006).

Al fine di definire un più accurato modello concettuale di questo acquifero, si dovrà in futuro poter far riferimento ad una maggiore densità di punti d'acqua per definire con più accuratezza l'andamento della superficie piezometrica e quindi del campo di moto della falda, nonché ulteriori valutazioni idrodinamiche tramite prove di emungimento e con traccianti ed una migliore conoscenza stratigrafica sulle aree ancora poco indagate dell'acquifero soprattutto nella zona sud e ai suoi limiti.

Questi approfondimenti permetteranno di confermare o meno i risultati ottenuti e di costruire un miglior modello concettuale e poter poi passare alla progettazione di un modello numerico affidabile sul quale basarsi per progettare più razionali utilizzi e valutarne gli effetti sulla risorsa.

Bibliografia

Autorità di Ambito Territoriale Ottimale (A.A.T.O.) 6 (1998) - *Valutazione del bilancio idrico ed idrogeologico dell'Ambito Territoriale Ottimale n. 6 "Ombrone": relazione finale*. Rapporto inedito a cura del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Siena (responsabile: Prof. M. Salleolini).

AA.VV. (1988) – *Proposta di normativa per l'istituzione delle fasce di rispetto delle opere di captazione delle acque sotterranee*. Ed. Geo-

Graph, Segrate (Milano).

Acquedotto del Fiora s.p.a. (2004) – Dati relativi ai consumi per uso idropotabile dei Comuni dell'ATO6.

Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (2004) – *Il Piano di Tutela delle Acque della Toscana*.

Amministrazione Provinciale di Siena (1992-1994) – *Il Piano acquedottistico della Provincia di Siena*.

Angelini P. & Dragoni W. (1993) - *Studio idrogeologico sulla sorgente di Bagnara: curva di esaurimento e risposta alle variazioni climatiche*. Acque sotterranee, 40, 21-27.

Barazzuoli P. & Micheluccini M. (1982) - *Idrologia ed aspetti idrogeologici*. In: Il Graben di Siena, CNR-PFE, SPEG, RF 9, Pisa, 37-60.

Barazzuoli *et alii* (1987) – *L'energia geotermica in Provincia di Siena* – Amministrazione Provinciale di Siena.

- Grafiche Al.Sa.Ba di Siena.
- Barazzuoli P. & Salleolini M. (1992) - *Evaluation of surface water and groundwater resources in watershed planning: comparison between various estimation methods*. Mem. Soc. Geol. It., 48(3), 813-817.
- Barazzuoli P. & Salleolini M. (1993) - *L'acqua: risorsa, rischio e pianificazione*. In: "La storia naturale della Toscana meridionale", Pizzi Ed., Milano, 173-246.
- Barazzuoli P. & Salleolini M. (1994) - *Variabilità climatica e trend delle risorse idriche rinnovabili nella Toscana meridionale*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione "Protezione delle Acque Sotterranee", 40, Pitagora Editrice, Bologna.
- Barazzuoli P. & Salleolini M. (1994b) - *Variabilità climatica e trend delle risorse idriche rinnovabili nella Toscana meridionale*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione "Protezione delle acque sotterranee", Pitagora Ed., Bologna, 49, 329-337.
- Barazzuoli P., Costantini A., Grassi S., Lazzarotto A., Micheluccini M., Piantelli F., Salleolini M., Sandrelli F., Squarci P., Taffi L. & Veronesi G. (1988) - *L'energia geotermica in Provincia di Siena: studi e ricerche per l'individuazione e lo sfruttamento non elettrico dei fluidi a medio-bassa temperatura per il territorio comprendente i comuni di Siena, Castelnuovo Berardenga, Asciano e Rapolano Terme*. Amministrazione Provinciale di Siena, Al.Sa.Ba. Grafiche, Siena.
- Barazzuoli P., Rappuoli D. & Salleolini M. (1995) - *Identification and comparison of perennial yield estimation models using Mt. Amiata aquifer (southern Tuscany) as an example*. Environmental Geology, 25 (2), 86-99.
- Barazzuoli et alii (2003) - *L'influenza della variabilità climatica sulle risorse idriche rinnovabili della Toscana meridionale*. Atti AIGA I* Primo Convegno Nazionale.
- Barazzuoli P., Mocenni B., Nocchi M., Rigati R. & Salleolini M. (2004) - *Risorse idriche nella Toscana meridionale*. Etruria natura (anno I - 2004), 41-54.
- Barazzuoli et alii (2004) - *Risorse idriche: valutazione fabbisogni e gestione*. SMaS Relazione inedita a cura del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli studi di Siena.
- Boni C.F., Bono P., Fanelli M., Funicello R., Parotto M. & Praturlon A. (1982) - *Carta delle manifestazioni termali e dei complessi idrogeologici d'Italia*. CNR-PFE, SPEG, RF 13, Roma.
- Castany G. (1967) - *Traité pratique des eaux souterraines*. Dunod, Paris.
- Castany G. (1968) - *Prospection et methodes de l'hydrogeologie*. Dunod, Paris.
- Celico P. (1988) - *Prospezioni idrogeologiche*. Voll. I e II, Liguori Editore, Napoli.
- Celico P., Gaudenzi E. & Saraca G. (1988) - *Lineamenti idrogeologici del bacino del Fiora (Toscana-Lazio)*. Boll. Serv. Geol. It., 107, 73-130.
- Civita M. (1972) - *Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di presa*. Mem. e Note Ist. Geol. Appl. Napoli, 12, 1-34.
- CLES (1991) - *Piano di Bacino del Fiume Ombrone: Studi preliminari. Volume I: Rapporto di sintesi*. Centro di ricerche e studi sui problemi del Lavoro, dell'economia e dello sviluppo. Roma.
- Cucini S. (1997) - *Costituzione di un sistema informativo territoriale locale (S.I.T.L.) finalizzato alla modellizzazione idrogeologica dell'acquifero più importante per l'approvvigionamento idrico del Comune di Siena*. Relazione inedita.
- Custodio E., Llamas M. R. (1983) - *Hydrologia Subterranea Vol I Segunda Edicion*. Edicion Omega S.A. Barcelona.
- De Felice A.M. & Dragoni W. (1993) - *Considerazioni su variazioni climatiche e disponibilità idriche in alcune località dell'Italia centrale*. Il Quaternario, 7 (1), 357-364.
- De Martonne E.M. (1926) - *Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité*. La Météorologie, 2, 449-458.
- Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Siena (1996) - *Studio idrogeologico della parte meridionale del Comune di Monteriggioni finalizzato al reperimento ed allo sfruttamento delle locali risorse idriche sotterranee*. Relazione inedita svolta per il Comune di Monteriggioni (editori Barazzuoli P. e Salleolini M.).
- Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Siena (1996/98) - *Ricerca idrogeologica finalizzata alla valutazione delle risorse idriche nell'area compresa tra la Montagnola Senese-Colle Val d'Elsa-Monteriggioni-Pian del Lago*. Relazione inedita svolta per la Publiser (Empoli) (editori Barazzuoli P. e Salleolini M.).
- Dipartimento di Scienze della Terra (1998a) - *Studio della valutazione della vulnerabilità dell'acquifero del M. Amiata: relazione preliminare*. Relazione inedita per la Giano Am-biente s.r.l. di Grosseto, maggio 1998. Coordinatori: P. Barazzuoli & M. Salleolini.
- Dipartimento di Scienze della Terra (1998c) - *Valutazione del bilancio idrico ed idrogeologico dell'Ambito Territoriale Ottimale n. 6 "Ombrone"*. Relazione inedita per l'Autorità di Ambito Territoriale Ottimale n. 6 "Ombrone", agosto 1998. Coordinatore: M. Salleolini.
- Giuffrida A. & Conte M. (1989) - *Variations climatiques en Italie: tendances des températures et des précipitations*. Publ. de l'Assoc. Intern. de Climat, 2, 209-216.
- Ministero LL.PP. - Servizio Idrografico - *Annali Idrologici*. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma, Anni vari, Parti I e II.
- Palmieri F., Siani A.M. & D'Agostino (1992) - *Tendenze evolutive della temperatura e delle piogge in Italia negli ultimi cento anni con osservazioni su una serie storica di precipitazioni nevose*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 15, 135-142.
- Rapetti F. & Vittorini S. (1991) - *Studio di serie pluviometriche secolari in Toscana*. In: "Le variazioni recenti del clima (1800-1990) e le prospettive per il XXI secolo", Proceedings of the Italian Geographical Society Conference, Roma 5-6 aprile 1990, Mem. Soc. Geogr. Ital., 46, 457-478.
- Regione Toscana (2000) - *Rapporto sullo stato dell'ambiente in Toscana*
- Thornthwaite C.W. (1948) - *An approach toward rational classification of climate*. Geographical Review, 38(1), 55-94.
- Thornthwaite C.W. & Mather J.R. (1957) - *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Thornthwaite Associates, Laboratory of Climatology, Centerton, N. J.
- Tonini D. (1983) - *Elementi di idrografia ed idrologia*. Voll. I e II, Ed. Libreria Cortina, Padova.
- Turc L. (1954) - *Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. La Houille blanche, 3 journées de l'hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris, 36-44.
- Vannozzi P. (1993) - *Variabilità climatica e trend delle risorse idriche rinnovabili nella Toscana*. Tesi di laurea inedita, Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Siena, A.A. 1993-1994.