

# Modello concettuale dell'acquifero carbonatico della Montagnola Senese (Toscana, Italy)

Jenny Migliorini, Fausto Capacci, Piero Barazzuoli, Roberto Rigati

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena, Centro Interdipartimentale di Ricerca sull'Acqua (C.R.A.)  
migliorini5@unisi.it, capacci10@unisi.it, barazzuoli@unisi.it, rigati@unisi.it. Autore corrispondente: Jenny Migliorini

*Conceptual model of the Montagnola Senese carbonate aquifer (Tuscany, Italy)*

**ABSTRACT:** The *Montagnola Senese* aquifer (known as the “*Luco*”) is an important and strategic water reserve in Southern Tuscany. With this study we have furthered our knowledge for the geometrical/structural, hydrodynamic and hydrochemical characterization of the aquifer and for the development of a conceptual model of it. The evaluation of the aquifer's recharge followed two paths: the first carried out by means of an indirect evaluation of the total infiltration in comparison to the water surplus, which lead to an estimate of an average recharge of over 21 million m<sup>3</sup>/year; the second based on the changes measured in the aquifer's piezometric levels, estimated at approximately 20 million m<sup>3</sup>/year. As far as the water reserve is concerned, it is evaluated at around 1.6 billion m<sup>3</sup>, that is to say about 100 times greater than the dynamic resource.

*Key terms:* Aquifer, Resource, Management, Luco  
*Termini chiave:* Acquifero, Risorsa, Gestione, Luco

## Riassunto

L'acquifero della Montagnola Senese (conosciuto come “Luco”) è considerato un importante serbatoio idrico strategico della Toscana Meridionale.

Questo studio ha consentito l'approfondimento delle conoscenze per una migliore caratterizzazione geometrico-strutturale, idrodinamica e idrochimica dell'acquifero e restituisce i risultati di un lavoro che ha l'obiettivo di realizzare un modello concettuale del medesimo ai fini di una corretta valutazione e gestione delle risorse idriche sotterranee.

I nuovi dati relativi alla geometria dell'acquifero, costituito dalle formazioni carbonatiche del Calcere Cavernoso e della Breccia di Grotti, sono stati acquisiti attraverso sondaggi geoelettrici, tomografie, stratigrafie di pozzi ed analisi della nuova cartografia geologica regionale 1:10000.

Ciò ha permesso di valutare la sua estensione, affiorante e non, pari a circa 166,3 Km<sup>2</sup> a fronte di un'area di alimentazione pari a circa 91,6 Km<sup>2</sup>. L'intero complesso idrogeologico permeabile risulta avere uno spessore medio di circa 178 m.

La valutazione della ricarica dell'acquifero ha seguito due strade.

La prima, una volta definita la superficie dell'area di ricarica per infiltrazione, attraverso la valutazione indiretta dell'infiltrazione totale in relazione all'eccedenza idrica calcolata. Tale valutazione (dati medi del periodo 1967-2006) porta a stimare la ricarica

media in oltre 21·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno.

La seconda, basata sulle escursioni dei livelli piezometrici di falda misurati (Marzo 2009-Gennaio 2010), individua una risorsa dinamica che, in virtù di una porosità efficace *ne* dell'8% (da letteratura tale complesso è caratterizzato da *ne* tra 5 e 10%), può essere valutata in circa 8,1·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno, ai quali andrebbero sommati i circa 12·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno di acqua che attualmente vengono prelevati dall'acquifero, per un ammontare complessivo della risorsa annua pari a circa 20·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

Pur con tutti i limiti connessi a tale tipo di valutazione, i risultati ottenuti, con i due criteri, sono in pieno accordo tra loro.

Per quanto concerne la riserva idrica, la sua valutazione è dell'ordine di 1,6·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, vale a dire circa 100 volte superiore alla risorsa dinamica.

Infine, se confrontiamo le valutazioni della risorsa rinnovabile con l'attuale domanda d'acqua ad uso idropotabile, si nota che a fronte di una ricarica media pari a circa 21·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, i consumi ammontano a circa 11,7·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, è quindi teoricamente possibile un ulteriore utilizzo della falda ospitata nell'acquifero del Luco.

## Introduzione

L'obiettivo di questo lavoro è quello di fornire un valido supporto scientifico alla progettazione e alle politiche di gestione della qualità e della conservazione delle risorse idriche del territorio.

Per lo studio dell'Acquifero Carbonatico della Monta-



Figura - 1: Ubicazione dell'area di studio  
Figure - 1: Map of the area under study

gnola Senese e Piano di Rosia o Acquifero del “Luco” (Codice Identificativo C.I.S.S. Regione Toscana: 99MM030), l’area indagata (Figura 1) occupa una porzione del territorio della Provincia di Siena per una superficie di circa 200 km<sup>2</sup> e ricade sotto le Amministrazioni comunali di Casole d’Elsa, Monteriggioni, Siena, Sovicille, Castellina in Chianti, Monteroni d’Arbia e Murlo (Fogli 2964, 2963, 2962, 2961 della Carta Topografica Regionale alla scala 1:25.000).

La zona di studio è relativamente estesa e, come tale, al suo interno si osservano diverse forme del rilievo: il paesaggio è prevalentemente collinare con quota media di circa 300 metri s.l.m.; tuttavia si osserva una discreta varietà di paesaggi sia collinari sia pianeggianti, in relazione alle caratteristiche litostrutturali delle formazioni geologiche affioranti e allo sviluppo morfologico e tettonico dell’area.

Il reticolo idrografico presenta diversi tipi di drenaggio. I più diffusi sono quelli dendritico e subparallelo-dendritico, è comunque rilevabile anche un certo controllo strutturale dell’andamento delle aste uviali principali, che sono quasi sempre orientate in direzione NE-SO oppure NO-SE.

Nell’area ricadono porzioni di due bacini di importanza regionale: quello del Fiume Ombrone, di cui fanno parte i due sottobacini del Fiume Merse e del Torrente Arbia, affluenti di destra; quello del Fiume Arno, di cui fa parte il sottobacino del Fiume Elsa.

Il crinale della Montagnola-Monte Maggio rappresenta lo spartiacque geomorfologico. L’ambito più esteso è quello del Fiume Merse che occupa gran parte dell’area considerata; quello del Fiume Elsa, meno esteso, è localizzato nella parte nord-occidentale dell’area oggetto di studio.

Il paesaggio presenta caratteri di tipo carsico, in quanto impostato sulle formazioni dolomitico-calcaree della Montagnola Senese. Si può pensare ad un avanzato stadio di morfogenesi carsica chiaramente desumibile dalle forme dolci ed arrotondate solcate da valli e vallecole, molte delle quali sospese e prive di corsi d’acqua.

La forma più rilevante è il polje che ha originato la conca di Pian del Lago. Altre forme diffuse sono doline, inghiottitoi e cavità ipogee a sviluppo orizzontale e verticale (Castagnini, 2008), chiara testimonianza dell’ottima capacità dei terreni presenti a farsi attraversare dalle acque.

### **Inquadramento geologico – strutturale e geometria dell’acquifero**

L’area in esame si localizza sul versante tirrenico dell’Appennino Settentrionale, che è una catena a pieghe e sovrascorrimenti (fold & thrust belt) il cui assetto strutturale è il risultato di articolate vicende geologiche precedenti da due fasi distinte: una fase divergente-distensiva

giurassica che ha portato all’apertura dell’Oceano Ligure-Piemontese e una convergente (dal Cretacico inferiore all’Eocene medio) che ha portato alla chiusura del bacino stesso. Le fasi successive che hanno caratterizzato la storia dell’Appennino Settentrionale hanno visto l’alternarsi di due eventi deformativi principali a partire dall’Oligocene D1 e D2 (Carmignani *et alii*, 1995; Decandia *et alii*, 1998; Liotta, 2002).

L’assetto geologico della zona è rappresentato in Figura 2. Di seguito vengono descritti i litotipi costituenti l’acquifero, secondo la differenziazione proposta nelle Note illustrative alla carta Geologica d’Italia, Foglio 296 Siena (Costantini *et alii*, 2010).

#### **Unità della Falda Toscana**

La Falda Toscana è rappresentata da termini calcarei che rivestono molta importanza nello studio idrogeologico perché, insieme ai terreni miocenici della Breccia di Grotti, costituiscono l’acquifero. Si colloca al tetto dell’Unità Toscana Metamorfica, di cui rappresenta le litologie di origine: in prevalenza calcari nella parte inferiore, mentre nella parte superiore prevale la componente silico-clastica (argille-marne).

La facies più diffusa nelle aree della Montagnola Senese è quella del *Calcare Cavernoso, CCA*: è costituita da una breccia tettonica ed autoclastica ad elementi carbonatici grigi e cemento calcareo, con tipica struttura a cellette (talvolta riempite da polvere grigia dolomitica nota in letteratura come “cenerone”); raramente presenta una grossolana stratificazione. La formazione è delimitata a letto e a tetto da contatti tettonici: essa poggia su formazioni diverse dell’Unità di Monticiano-Roccastrada ed è sormontata dalle formazioni delle Unità liguri ed in particolare dalle Argille a palombini; il suo spessore è, di conseguenza, molto variabile; quello massimo è valutabile in alcune centinaia di metri. Per quanto riguarda l’età, tale formazione viene attribuita al Norico (Triassico sup.) sulla base di correlazioni litostratigrafiche con altri affioramenti della Toscana.

#### **Formazioni Neogeniche**

Le formazioni Neogeniche sono legate alla fase tettonica distensiva. Nei bacini formati in questa fase si realizzano diversi cicli deposizionali marini e continentali dovuti all’azione combinata di variazioni eustatiche e movimenti tettonici verticali. Nell’area di studio le litologie depositatesi in questo contesto mostrano il risultato della rielaborazione (erosione-trasporto-sedimentazione) delle rocce preesistenti.

Le litologie caratterizzanti sono composte, quindi, da sabbie, argille e conglomerati di ambiente continentale e da successioni di ambiente marino.

La *Breccia di Grotti, MESa* (Miocene Superiore), che affiora diffusamente ad est della dorsale Montagnola-Monte Maggio, tra le formazioni neogeniche è quella che riveste maggiore interesse nel presente studio.

La sua importanza è dovuta al fatto che giace in mas-





sima parte sul Calcare Cavernoso ed è, per la sua natura sedimentaria, una roccia ad alta permeabilità relativa. Essa è infatti costituita da brecce e conglomerati, localmente stratificati in modo grossolano, ad elementi di dimensioni variabili da 2 a 30 centimetri provenienti per la maggior parte dalla Formazione anidritica di Burano-Calcare Cavernoso. Subordinatamente si rinvengono clasti di anageniti e quarziti riferibili alle formazioni del Gruppo del Verrucano, nonché calcari delle unità toscane e liguri. Intercalati alla breccia sono individuabili blocchi di calcare cavernoso di dimensioni metriche. La matrice è costituita da sabbie e sabbie limose calcaree. In molte zone vicine alla Dorsale Medio Toscana, dove la matrice è scarsa o assente, il basso grado di rielaborazione dei clasti rende mal distinguibile la Breccia di Grotti dal Calcare Cavernoso (Formazione anidritica di Burano). Lo spessore massimo della Breccia di Grotti è di circa 180 metri. In considerazione delle sue facies sedimentarie, la formazione è da riferire ad un ambiente continentale, da alluvionale subaereo a lacustre subacqueo.

In base ai suoi rapporti eteropici con le Argille del Casino e con le Argille e gessi del F. Era Morta, la Breccia di Grotti è attribuibile al Turoliano superiore (Messiniano superiore).

### Inquadramento Climatico

I dati relativi all'inquadramento climatico dell'area in esame sono stati ripresi da Barazzuoli *et alii*, 2010; successivamente sono stati analizzati i valori propri dell'acquifero della Montagnola Senese con riferimento all'Anno Idrologico medio 1967-2006.

Facendo riferimento ad un database di dati di pioggia relativi a 74 stazioni, per un totale di 2960 anni, sono stati analizzati, per la definizione dell'A.I (Anno Idrologico Medio), i dati relativi alle precipitazioni individuando le stazioni pluviometriche situate nel territorio della Provincia di Siena più significative per la loro posizione nell'area in studio, per la lunghezza del periodo di osservazione e per la continuità del loro funzionamento.

Nell'acquifero in studio si registra un maggiore gradiente nelle precipitazioni medie annue nella parte Ovest (Pievescola) dell'area occupata dall'acquifero (con max intorno ai 970 mm). I valori minimi di pioggia si riscontrano nella parte Est (Petriccio) con valori intorno ai 770 mm.

Il valore medio di pioggia all'interno del limite dell'acquifero è stimabile in 839 mm/anno.

L'esame delle temperature medie annue dell'area in esame evidenzia all'interno del territorio occupato dall'acquifero un valore di temperatura media annua abbastanza stabile. Si registra un aumento di temperatura media annua a Sud, nei pressi del Piano di Rosia; in due fasce laterali rispettivamente a Nord-Est (Badesse, Tognazza, Petriccio) e ad Ovest (Pievescola), invece, si individua un'area in cui la temperatura tende a diminuire.

Queste leggere variazioni sono da imputarsi alle differenze di quota presenti nell'area in oggetto. La temperatura media annua all'interno dell'acquifero della Montagnola Senese è pari a circa 13,9°C.

Per la valutazione dell'evapotraspirazione reale (Er) media annua, si è scelto di fare riferimento alla formulazione di Thornthwaite & Mather (1957). L'esame di questo parametro evidenzia che i valori massimi di Er (maggiori di 620 mm) si riscontrano nella parte sud. I suoi valori minimi si rilevano nella zona più a Nord presso Monteriggioni con valori inferiori ai 570 mm. Il valore medio annuo per l'area occupata dall'acquifero della Montagnola Senese è stimabile in 595 mm (ca. il 70% delle precipitazioni).

Successivamente, tramite la differenza tra i valori di pioggia e i valori dell'evapotraspirazione reale, è stato possibile ottenere i quantitativi medi annui di Eccedenza idrica, pari a circa 269 mm. La conoscenza di tali volumi ha portato, utilizzando un procedimento di calcolo basato sui coefficienti di infiltrazione potenziali (Celico, 1988), alla stima dell'infiltrazione media meteorica presente all'interno dell'acquifero (periodo 1967-2006). Ipotizzando per l'acquifero in studio un valore di coefficiente di infiltrazione potenziale pari a 0,9, si è stimato un valore di infiltrazione totale media pari a circa  $21 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

### Ricostruzione geometrica dell'acquifero

La prima operazione che abbiamo effettuato è la ricostruzione, il più possibile corretta e dettagliata, della geometria dell'acquifero, che ha portato alla realizzazione di un modello concettuale il più possibile vicino alla realtà. Questo ha consentito di ottenere corretti risultati nella valutazione delle caratteristiche dell'acquifero.

Per la definizione della geometria del corpo studiato sono state necessarie alcune conoscenze di base, ovvero è stato necessario ottenere informazioni sia sugli spessori dell'acquifero, sia sulle caratteristiche idrogeologiche dei litotipi che lo delimitano e sulla presenza di elementi strutturali (faglie).

Per far questo, oltre che a ricorrere all'utilizzo della Carta Geologica regionale in scala 1:10.000 e delle stratigrafie dei pozzi (presenti sul territorio in studio), sono state impiegate le indagini geofisiche (S.E.V. e tomografia) effettuate sia in precedenza che nell'ambito di questo lavoro (Figura 2).

La lettura critica degli studi pregressi e attuali (Capacci *et alii*, 2008; D'Onofrio, 2008/2009), seguita alla redazione di un database delle prospezioni effettuate e dei relativi risultati, ha permesso di redigere le sezioni interpretative (Figura 3) che forniscono informazioni circa l'assetto dell'acquifero, chiarendo aspetti riguardo la profondità del substrato, lo spessore dell'acquifero ed i suoi limiti laterali.

Le elaborazioni, successive sono state eseguite tramite

operazioni di gridding e contouring interpolando i dati archiviati secondo fogli di calcolo integrati a porzioni di DTM opportunamente selezionate secondo le litologie affioranti.

Per quanto riguarda i punti quotati utilizzati per la ricostruzione del tetto e del substrato dell'acquifero nella parte affiorante, costituita dalle formazioni del Calcarea Cavernoso e della Breccia di Grotti, essi corrispondono ai dati della superficie topografica estrapolati dal DTM; nelle restanti aree, dove il complesso calcareo è in profondità, e quindi non affiora, i dati sono stati acquisiti tramite le prospezioni geofisiche, le stratigrafie dei pozzi e le sezioni idrogeologiche da noi redatte.

Le isobate del tetto del Complesso Calcarea in studio sono rappresentate in Figura 4; la topografia dell'acquifero oscilla da un massimo di 633 m s.l.m. in corrispondenza del Monte Maggio ad un minimo di -239 m s.l.m. nel Piano di Rosia. L'andamento della geometria dell'acquifero subisce, in alcune zone, un abbassamento repentino come ad est di Sovicille e Rosia verso il San Rocco a Pili oppure in corrispondenza del margine nord occidentale nei pressi di Strove ed Abbadia Isola. La quota media del tetto dell'acquifero è risultata pari a circa 256 m s.l.m.

L'andamento delle isobate del substrato, ossia della base dell'acquifero, è illustrato in Figura 5 e presenta una definizione di qualità del dato abbastanza variabile; è infatti meno accurata nella parte nord della zona di studio a causa della densità piuttosto bassa delle prospezioni geofisiche. Il substrato dell'acquifero, a causa della presenza di un sistema di faglie che lo ribassa, presenta quote molto variabili, da un massimo di 555 m s.l.m. a nord di Simignano ad un minimo di -348 m s.l.m. nel Piano di Rosia. Dall'analisi della base dell'acquifero si nota un alto strutturale a nord di Sovicille e una depressione presente al di sotto del Piano di Rosia. La quota media del substrato dell'acquifero è risultata pari a circa 78 m s.l.m..

Una volta ottenute le carte del tetto e della base dell'acquifero siamo passati alla realizzazione della carta delle isopache, ovvero dello spessore delle formazioni carbonatiche che lo costituiscono. L'operazione è così formalizzata:  $Q_t - Q_s = Ha$ , dove  $Q_t$  è la quota del tetto,  $Q_s$  la quota del substrato,  $Ha$  lo spessore calcolato dell'acquifero. Risultante da questa operazione è la carta delle isopache dell'acquifero (Figura 6).

L'estensione dell'acquifero risultante dai dati di base utilizzati è significativa e pari a circa 166,3 Km<sup>2</sup> a fronte di un'area di alimentazione (corrispondente alla superficie affiorante del complesso calcareo) pari a circa 91,6 Km<sup>2</sup>. Il procedimento ha permesso di stimare i maggiori spessori, che si osservano, come era logico aspettarsi, in corrispondenza del Monte Maggio, dove raggiungono i 627 m. L'area a Sud-Est, nel Piano di Rosia, mostra abbastanza chiaramente uno spessore medio-basso dell'acquifero che va piano piano

assottigliandosi fino a scomparire. Mediamente, l'intero complesso risulta avere uno spessore di circa 178 m.

Il calcolo del volume totale, risultante dal prodotto dell'area della carta delle isopache per lo spessore medio, risulta circa 29,5·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. Questo dato, molto rilevante, non può che confermare l'elevata capacità d'immagazzinamento potenziale dell'acquifero; i dati presenti in letteratura gli assegnano una porosità efficace dell'8% (Barazzuoli *et alii*, in Note illustrative alla Carta Geologica d'Italia a scala 1:50000, Foglio 296 – Siena; Costantini *et alii*, 2010), pari ad un volume di vuoti efficaci interconnessi di circa 2,4·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.

### Caratterizzazione idrodinamica del sistema acquifero

Al fine di descrivere l'andamento spaziale e temporale della superficie piezometrica è stata effettuata una campagna di rilevamento del carico idraulico, iniziata nel mese di Marzo 2009 e conclusa nel mese di Gennaio 2010. In questo periodo sono stati monitorati 31 pozzi la cui distribuzione è visibile in Figura 7.

In Tabella 1, sono riportati in elenco i pozzi monitorati, grazie ai quali è stato possibile realizzare la carta delle isopiezometriche medie della falda.

In aggiunta a questi, grazie ai dati forniti dall'acquedotto del Fiora Spa, sono stati inseriti i livelli piezometrici dei pozzi dell'acquedotto situati poco a nord dell'abitato di Rosia.

La scelta dei pozzi da sottoporre ai controlli piezometrici è stata notevolmente condizionata dalla loro irregolare distribuzione territoriale; la maggior parte di essi è rilevabile in corrispondenza degli agglomerati urbani, mentre vi sono delle zone di bassa densità abitativa (spesso sono aree interessate da copertura boschiva) in cui la presenza dei pozzi è assai limitata. E' da sottolineare che il continuo emungimento, cui è sottoposta la falda per i vari utilizzi, comporta la possibilità di misurarne, in alcuni pozzi, spesso solo il livello dinamico; la piezometria risulta quindi localmente alterata rispetto alle condizioni naturali, soprattutto nel periodo estivo, a causa di pratiche irrigue.

Inoltre, nella zona sono presenti pozzi dell'acquedotto del Fiora, che servono per approvvigionare di acqua potabile i Comuni di Siena, Monteriggioni, Asciano, Casole d'Elsa, Chiusdino, Colle di Val d'Elsa e Sovicille; i rimanenti pozzi monitorati vengono impiegati per uso domestico, agricolo e produttivo.

Le superfici piezometriche medie relative ai vari mesi di misura sono state ricostruite con i livelli misurati in tutti i pozzi tenuti sotto osservazione (escluso il pozzo 327) e con l'aggiunta di due pozzi in località Rosia dell'acquedotto del Fiora Spa.

In Figura 7 è riportata la piezometria media per il periodo monitorato.

Tabella - 1: Elenco dei pozzi monitorati durante il periodo 2009-2010

Table - 1: List of wells monitored during the period 2009-2010

| Codice<br>Università | Coord Est<br>Gauss Boaga | Coord Nord<br>Gauss Boaga | Quota<br>m s.l.m. | Piezometria media<br>m s.l.m. |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------|
| 16                   | 1683259.82               | 4801805.98                | 263               | 183.41                        |
| 53                   | 1682192.00               | 4796203.00                | 249               | 185.76                        |
| 60                   | 1683496.00               | 4795475.00                | 205               | 184.82                        |
| 71                   | 1681033.26               | 4795276.63                | 242               | 184.65                        |
| 73                   | 1680896.00               | 4796330.00                | 231               | 185.57                        |
| 84                   | 1682685.00               | 4806354.00                | 241               | 185.30                        |
| 95                   | 1673457.66               | 4797606.53                | 306               | 187.72                        |
| 108                  | 1683904.00               | 4802439.00                | 276               | 189.09                        |
| 116                  | 1682111.00               | 4801394.00                | 274               | 187.12                        |
| 120                  | 1676583.00               | 4805513.00                | 248               | 185.01                        |
| 131                  | 1683958.00               | 4799419.00                | 273               | 185.07                        |
| 166                  | 1681017.00               | 4788368.00                | 226               | 187.96                        |
| 186                  | 1681060.00               | 4790401.00                | 194               | 185.28                        |
| 227                  | 1682663.00               | 4804480.00                | 270               | 190.91                        |
| 237                  | 1675681.00               | 4802851.00                | 299               | 185.39                        |
| 254                  | 1680711.00               | 4791246.00                | 193               | 185.77                        |
| 293                  | 1684804.00               | 4792801.00                | 197               | 183.84                        |
| 314                  | 1677737.00               | 4806216.00                | 204               | 183.69                        |
| 315                  | 1678663.00               | 4805985.00                | 194               | 184.84                        |
| 316                  | 1679011.00               | 4805790.00                | 196               | 185.34                        |
| 317                  | 1681052.49               | 4806738.69                | 210               | 183.81                        |
| 318                  | 1684371.00               | 4796015.00                | 218               | 187.05                        |
| 319                  | 1681653.00               | 4796518.00                | 229               | 184.50                        |
| 320                  | 1680609.00               | 4796817.00                | 250               | 185.67                        |
| 321                  | 1679672.00               | 4795127.00                | 274               | 185.62                        |
| 322                  | 1681794.00               | 4792891.00                | 200               | 186.00                        |
| 323                  | 1680264.25               | 4791494.00                | 223               | 185.09                        |
| 324                  | 1681563.00               | 4792045.00                | 189               | 185.67                        |
| 325                  | 1680782.00               | 4793820.00                | 247               | 185.89                        |
| 326                  | 1684964.00               | 4805739.00                | 265               | 189.02                        |
| 327                  | 1674046.00               | 4805032.00                | 250               | -                             |

I dati raccolti mettono in evidenza che la falda è in parte libera e in parte confinata e che la superficie si presenta morfologicamente stabile durante tutto il periodo monitorato, nonostante la diversa intensità dei prelievi e delle precipitazioni meteoriche. La variazione media tra il livello massimo ed il livello minimo misurato risulta infatti pari a circa 0,71 m.

L'analisi di Figura 7 mostra che il movimento dell'acqua sotterranea avviene prevalentemente in due direzioni: verso Sud (Piano di Rosia) e verso Nord-Ovest (Abbadia Isola e Strove). Nel settore Nord-Est è possibile osservare un vero e proprio spartiacque idrogeologico, con andamento circa Est-Ovest, che separa i due flussi d'acqua. Come era da aspettarsi, le maggiori depressioni

piezometriche si osservano in prossimità dei pozzi dell'acquedotto (Piano di Rosia e Pian del Lago) caratterizzate da valori inferiori a 184 m s.l.m.. L'analisi della superficie piezometrica, relazionata alla geometria dell'acquifero ricostruita precedentemente, ha consentito di individuare due particolari limiti geologici, uno nella parte ovest e uno nella porzione sud-est dell'acquifero.

Il primo limite è dovuto alla presenza di una faglia orientata nord-ovest sud-est che disloca l'acquifero, come si può vedere nelle sezioni di Figura 3, e individua una zona denominata area di alimentazione dell'acquifero senza falda permanente; il livello piezometrico monitorato ha una quota media di circa 185-186 m s.l.m. ed esclude la continuità della falda al di là della faglia.

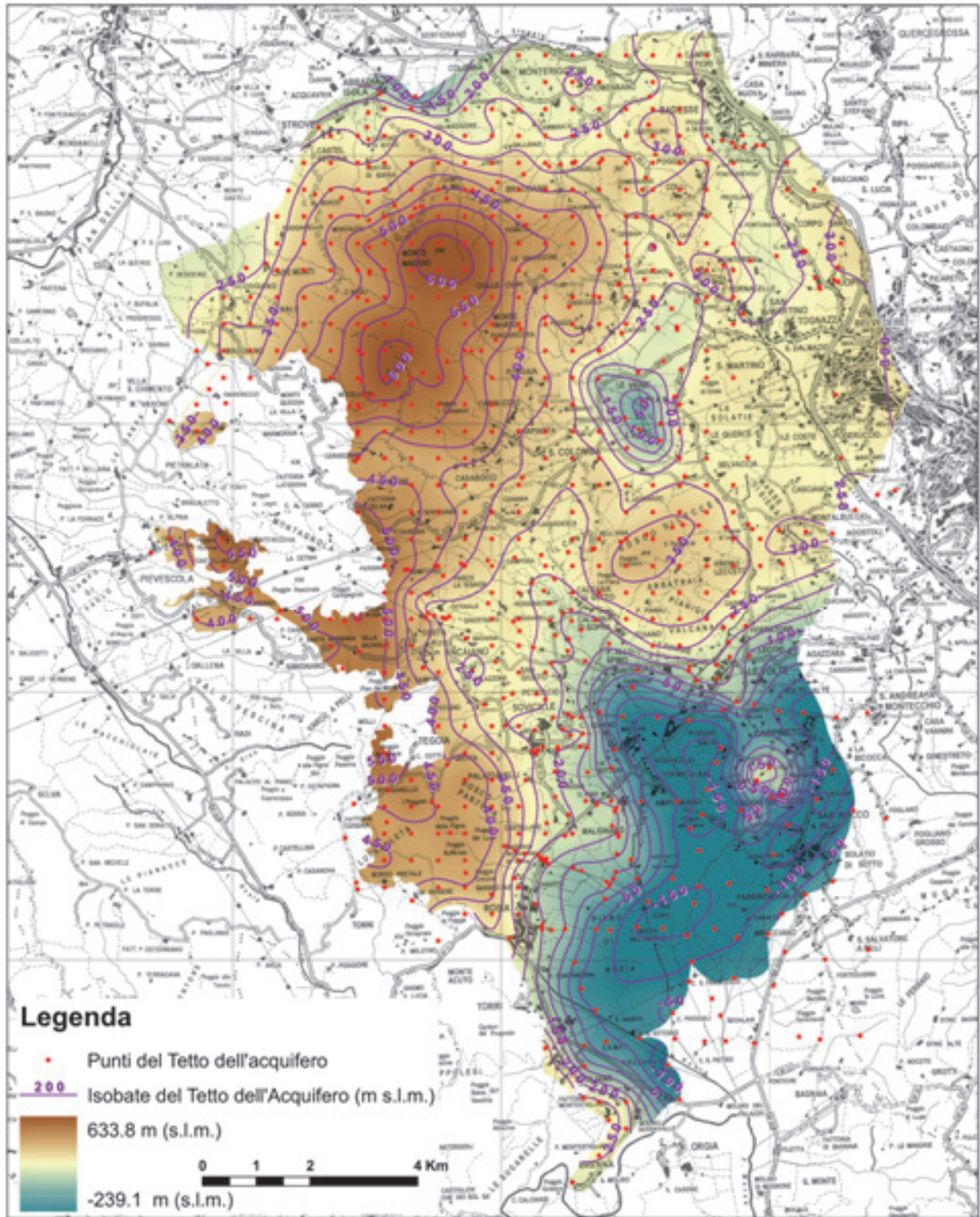


Figura - 4: Carta delle isobate del tetto dell'acquifero (dimensioni delle celle 10x10 m)  
Figure - 4: Map of the isobaths of the roof of the aquifer (cell size 10x10 m)

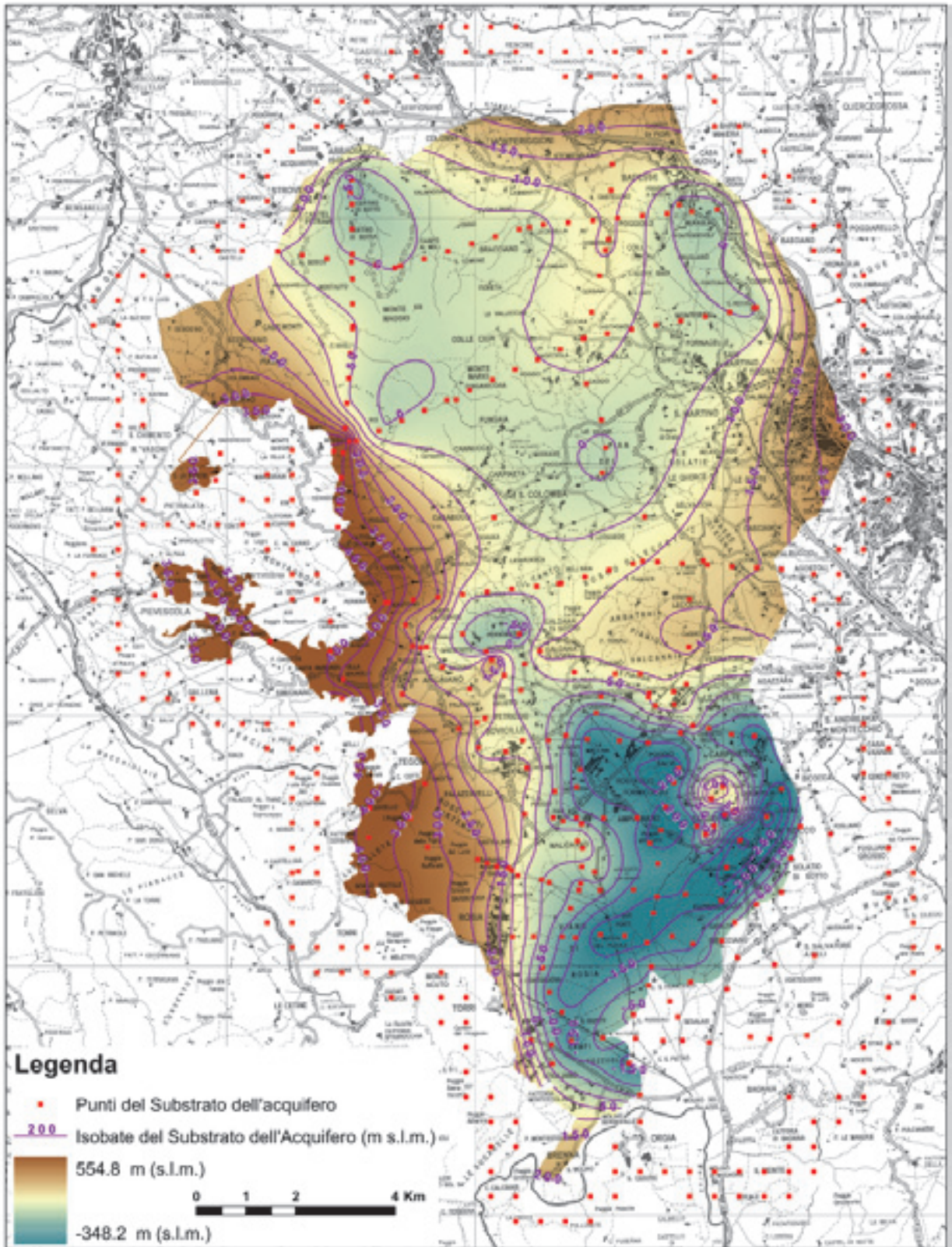


Figura - 5: Carta delle isobate della base dell'acquifero (dimensioni delle celle 10x10 m)

Figure - 5: Map of the isobaths of the base of the aquifer (cell size 10x10 m)

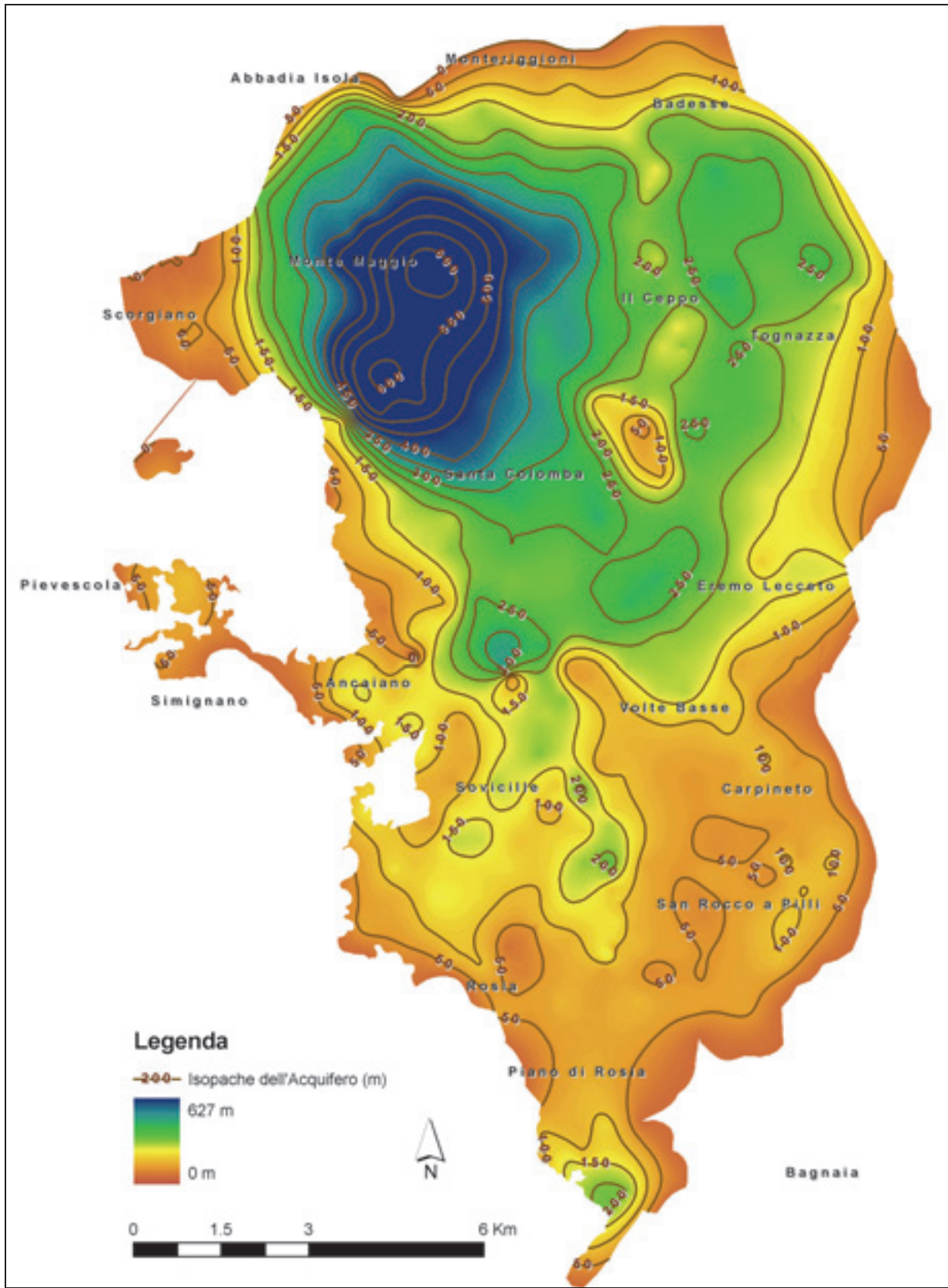


Figura - 6: Carta delle isopache dell'acquifero (dimensioni delle celle 10x10 m)

Figure - 6: Thickness map of the aquifer (cell size 10x10 m)

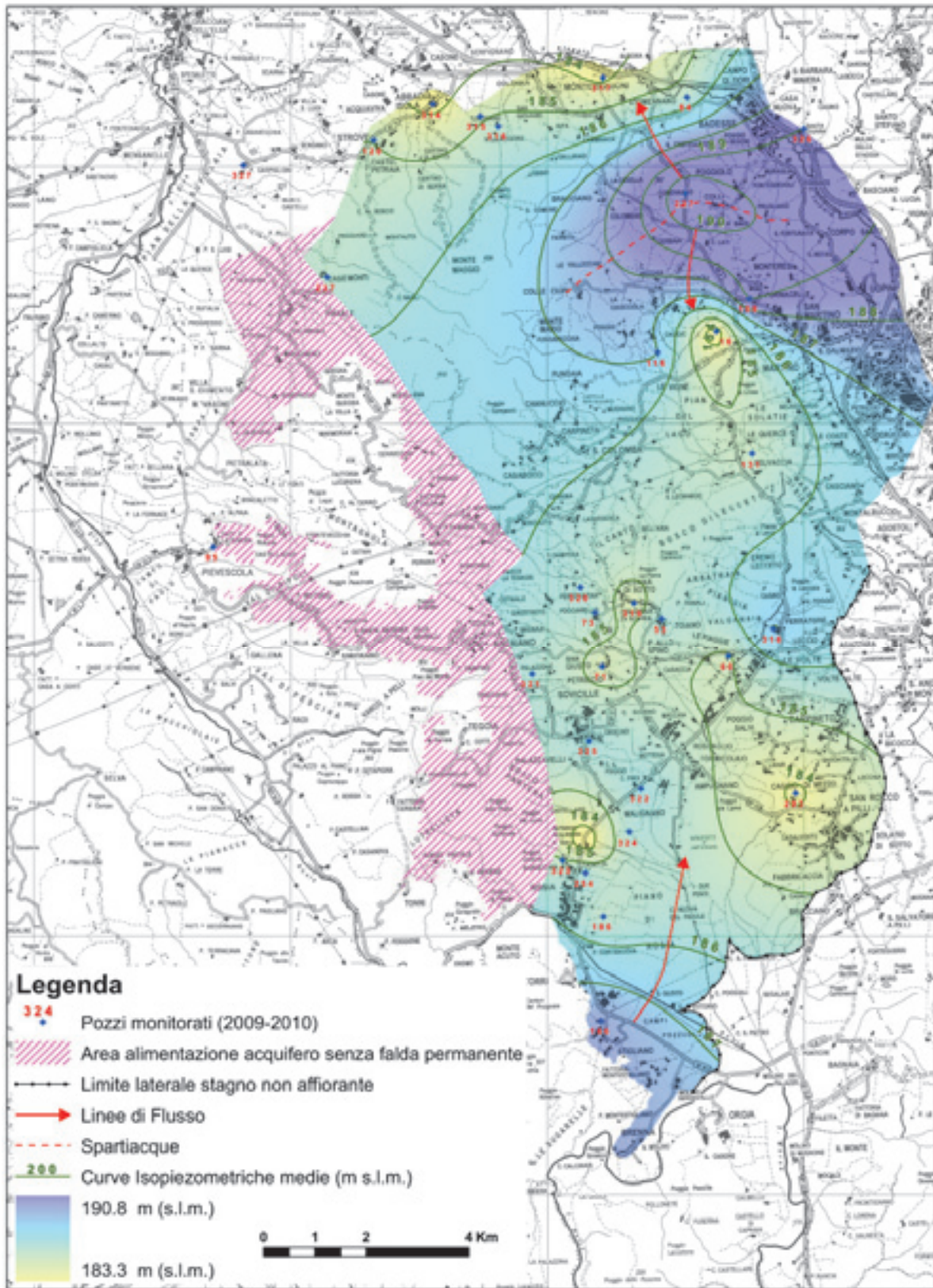


Figura - 7: Carta delle Isopieze medie per il periodo monitorato (2009-2010)

Figure - 7: Map for Isopiestic line medium in the period monitored (2009-2010)

A ovest della faglia si hanno poche informazioni stratigrafiche e piezometriche, ma permettono in prima analisi di considerare questa porzione di acquifero come area di alimentazione senza una falda permanente vera e propria, anche se non si escludono zone dove la falda permanente potrebbe esistere (es. zona di Scorgiano e Maggiano).

Il secondo limite presente nel sottosuolo del settore sud-est dell'acquifero è stato individuato dall'analisi dei dati stratigrafici derivati quasi esclusivamente dai SEV eseguiti (S.G.G., 1992), che hanno permesso di definire in maniera abbastanza precisa la chiusura dell'acquifero. Tale limite, denominato "stagno", non esclude che ci siano collegamenti idraulici con i depositi pliocenici.

L'abbassamento piezometrico tra i livelli massimi e minimi deriva ovviamente dalla combinazione dei quantitativi idrici in uscita ed in entrata nell'acquifero. Questi ultimi sono qui associati a vari tipi di ricarica: a) infiltrazione diretta di acque meteoriche; b) passaggio d'acqua attraverso i limiti dell'acquifero.

### Caratterizzazione idrochimica dell'acqua di falda

Al fine di valutare le principali caratteristiche fisico-chimiche della falda sono stati eseguiti, contemporaneamente alle misure piezometriche di Luglio 2009, campionamenti di acqua da sottoporre ad analisi chimiche, tali da valutare il contenuto in ioni maggiori, per un totale di 20 campioni (i cui codici sono riportati in Tabella 2, mentre la loro ubicazione è riportata nelle Figure 8 e 9); inoltre durante tutta la campagna piezometrica (Marzo 2009 – Gennaio 2010) è stata misurata, quando e ove possibile, la conducibilità elettrica e la temperatura dell'acqua di falda di 22 punti di misura.

I dati conducimetrici rilevati durante il periodo marzo 2009-gennaio 2010 hanno consentito la stesura di carte delle isoconduttive dell'acqua di falda con le quali è possibile evidenziare la distribuzione della salinità totale nella zona studiata.

Sostanzialmente non si riscontrano notevoli cambiamenti di conducibilità nell'arco del periodo di misurazione, tranne piccole fluttuazioni di modesta importanza. Le conducibilità medie (Figura 8) del periodo sono comprese nell'intervallo 417 – 2300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , anche se in quasi tutto l'acquifero i valori sono compresi nell'intervallo 650 – 780  $\mu\text{S}/\text{cm}$  tipico di acque circolanti a contatto con litologie argillose – calcaree (Breccia di Grotti); valori più elevati ( $> = 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), riscontrati nella zona nord-est (Lornano – Badesse) come nel pozzo 326 (Santa Chiara), sono dovuti al passaggio in litologie di tipo gessoso-solfifera (Anidridi di Burano?) e perché si trovano in corrispondenza del limite dell'acquifero caratterizzato dalla presenza di una faglia, da dove l'acquifero, potrebbe ricevere un contributo di acque termali; ciò è confermato anche dai valori di temperatura

delle acque più alti della media, come riscontrato in corrispondenza del pozzo 237 (Case Monti).

Tabella - 2: Elenco dei codici di riferimento dei pozzi utilizzati per il campionamento chimico delle acque sotterranee  
Table - 2: List of reference numbers of wells used for sampling groundwater chemical

| Codice Analisi Chimiche | Codice Università        |     |
|-------------------------|--------------------------|-----|
| Pozzo 2                 | Volte Basse              | 60  |
| Pozzo 4                 | Toiano                   | 53  |
| Pozzo 8                 | Sparavichio              | 322 |
| Pozzo 9                 | Rosia "Arpat"            | 254 |
| Pozzo 10                | Barbicciaia              | 323 |
| Pozzo 11                | Colombaia                | 293 |
| Pozzo 14                | Valmaggione              | 316 |
| Pozzo 15                | Valmaggione              | 315 |
| Pozzo 16                | Abbadia Isola            | 314 |
| Pozzo 20                | Fornacelle               | 108 |
| Pozzo 21                | Case Monti               | 237 |
| Pozzo 24                | Cava Val Di Merse        | 227 |
| Pozzo 26                | Il Caggio                | 116 |
| Pozzo 28                | Pod. La Rancia Stigliano | 166 |
| Pozzo 30                | Malignano                | 324 |
| Pozzo 31                | Trecciano                | 321 |
| Pozzo 32                | Andreadis                | 73  |
| Pozzo 33                | Capresi                  | 320 |
| Pozzo 35                | Il Casalino Badesse      | 84  |
| Pozzo 36                | Santa Chiara             | 326 |

Tutte le acque in esame ricadono nella fascia delle acque medio – minerali e solo in un caso (Pozzo 326) nel campo delle acque minerali, dove è stato rilevato un valore medio di conducibilità pari a 2370  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Per quanto riguarda la temperatura (Figura 9) delle acque di falda, i valori medi risultano pari a circa 14°C; quindi le acque in esame si possono definire minerali fredde.

I valori più bassi si rinvencono nelle vicinanze delle zone di infiltrazione, mentre quelli più alti possono essere tipici di aree dove le acque hanno avuto una circolazione più profonda (pozzi 237 e 326) relazionata anche alla vicinanza di strutture tettoniche (faglie).

In Tabella 3 sono riportate le concentrazioni in mg/l dei quattro cationi e dei quattro anioni più significativi per tutti i 20 punti di campionamento ed il loro bilancio ionico, dal quale emerge che tutti i bilanci sono inferiori al valore soglia del 5%, constatando la validità dei risultati e la possibilità di essere elaborati ed interpretati.

In definitiva, pur con i limiti suddetti, si può asserire che, almeno per quanto riguarda i parametri chimico-fisici analizzati, le acque dell'acquifero del "Luco" sono da definire di buona qualità per l'uso idropotabile.

Tra i diagrammi in grado di interpretare qualitativamente il chimismo delle acque, si è scelto di utilizzare quello di Piper utilizzando il software AquaChem, che ha richiesto la realizzazione di un database comprendente tutte le informazioni relative alle analisi chimiche dei campioni di acqua sotterranea prelevati durante la campagna di monitoraggio effettuata nel Luglio 2009.

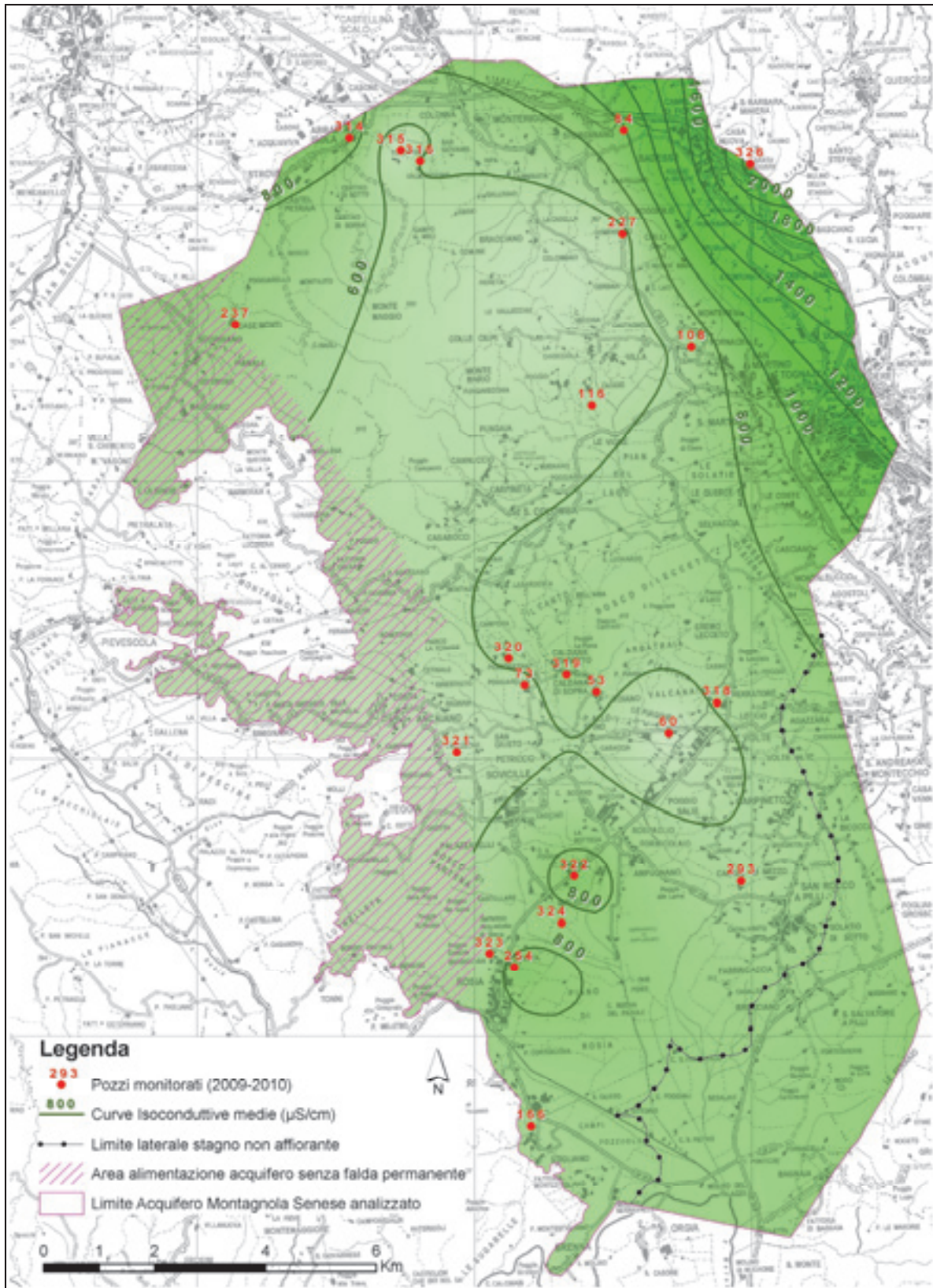


Figura - 8: Carta delle isoconduttive medie misurate nel periodo Marzo 2009 – Gennaio 2010  
Figure - 8: Map of Iso-conductivity medium measured in the period March 2009 - January 2010



Il diagramma (Figura 10) ha evidenziato come quasi la totalità dei campioni ricada all'interno del campo delle acque bicarbonato-alcalino terrose con la formula anionica  $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$  e cationica  $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na}$  che variano da estremamente pura (pozzo 116) a variamente mescolata a una componente bicarbonato-magnesiaca (pozzo 293) o ad una componente più solfatica (pozzi

324 e 326). I campioni di acqua dei pozzi 322 e 237 ricadono all'interno del campo delle acque *solfato-alcalino-terrose*, ma sempre con una forte componente bicarbonatica.

Tali interpretazioni sono, inoltre, confermate dai diagrammi rettangolare (D'Amore *et alii*, 1983) e di Schoeller-Berkaloff (in Celico, 1986).

Tabella - 3: Risultati analitici sui campioni d'acqua di falda raccolti in Luglio 2009  
 Table - 3: Analytical results on samples of groundwater collected in July 2009

| Cod. Analisi Chimiche | Cod. Università | Ca<br>(mg/l) | Mg<br>(mg/l) | Na<br>(mg/l) | K<br>(mg/l) | Cl<br>(mg/l) | SO4<br>(mg/l) | NO3<br>(mg/l) | HCO3<br>(mg/l) | BILANCIO IONICO |
|-----------------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|
| Pozzo 2               | 60              | 62.17        | 17.58        | 15.89        | 1.12        | 18.29        | 23.32         | 20.67         | 268.4          | -4.23           |
| Pozzo 4               | 53              | 119.82       | 23.44        | 12.96        | 2.56        | 20.32        | 121.30        | 26.10         | 280.6          | 2.51            |
| Pozzo 8               | 322             | 140.36       | 38.37        | 18.96        | 0.75        | 42.56        | 224.21        | 73.96         | 292.8          | -3.75           |
| Pozzo 9               | 254             | 120.79       | 23.77        | 51.60        | 0.30        | 127.17       | 27.05         | 19.86         | 363.0          | -0.89           |
| Pozzo 10              | 323             | 115.52       | 12.93        | 10.63        | 3.92        | 17.84        | 53.87         | 31.70         | 298.9          | 2.47            |
| Pozzo 11              | 293             | 35.99        | 49.57        | 66.54        | 3.30        | 80.31        | 99.28         | 0.32          | 292.8          | -1.59           |
| Pozzo 14              | 316             | 115.97       | 10.14        | 13.62        | 0.62        | 13.47        | 66.17         | 96.91         | 268.4          | -3.28           |
| Pozzo 15              | 315             | 68.35        | 10.09        | 11.65        | 0.16        | 14.09        | 30.22         | 67.89         | 183.00         | -3.68           |
| Pozzo 16              | 314             | 172.82       | 12.43        | 16.92        | 3.75        | 49.71        | 43.74         | 139.20        | 335.5          | 2.06            |
| Pozzo 20              | 108             | 99.61        | 36.30        | 14.71        | 0.73        | 17.28        | 18.26         | 25.92         | 451.4          | -0.40           |
| Pozzo 21              | 237             | 135.73       | 36.15        | 14.72        | 5.22        | 26.87        | 246.53        | 38.59         | 268.4          | -1.83           |
| Pozzo 24              | 227             | 108.42       | 25.07        | 6.67         | 1.13        | 11.14        | 16.77         | 1.77          | 402.6          | 3.32            |
| Pozzo 26              | 116             | 128.12       | 4.72         | 6.43         | 7.13        | 10.44        | 3.84          | 13.32         | 420.9          | -1.65           |
| Pozzo 28              | 166             | 144.58       | 4.86         | 8.26         | 3.19        | 16.68        | 28.93         | 108.70        | 353.8          | -3.41           |
| Pozzo 30              | 324             | 170.44       | 36.32        | 16.64        | 1.88        | 25.43        | 267.49        | 14.17         | 396.5          | -2.96           |
| Pozzo 31              | 321             | 109.05       | 4.82         | 6.99         | 1.39        | 11.55        | 12.19         | 25.63         | 329.4          | -1.70           |
| Pozzo 32              | 73              | 116.81       | 7.67         | 4.99         | 0.52        | 8.96         | 9.86          | 33.28         | 378.2          | -3.62           |
| Pozzo 33              | 320             | 133.13       | 10.07        | 8.88         | 1.01        | 11.18        | 15.84         | 34.65         | 445.3          | -3.77           |
| Pozzo 35              | 84              | 188.06       | 28.49        | 32.05        | 1.48        | 108.41       | 45.02         | 107.64        | 500.2          | -2.84           |
| Pozzo 36              | 326             | 508.86       | 82.16        | 45.63        | 4.07        | 51.94        | 805.65        | 0.05          | 1165.1         | -4.33           |

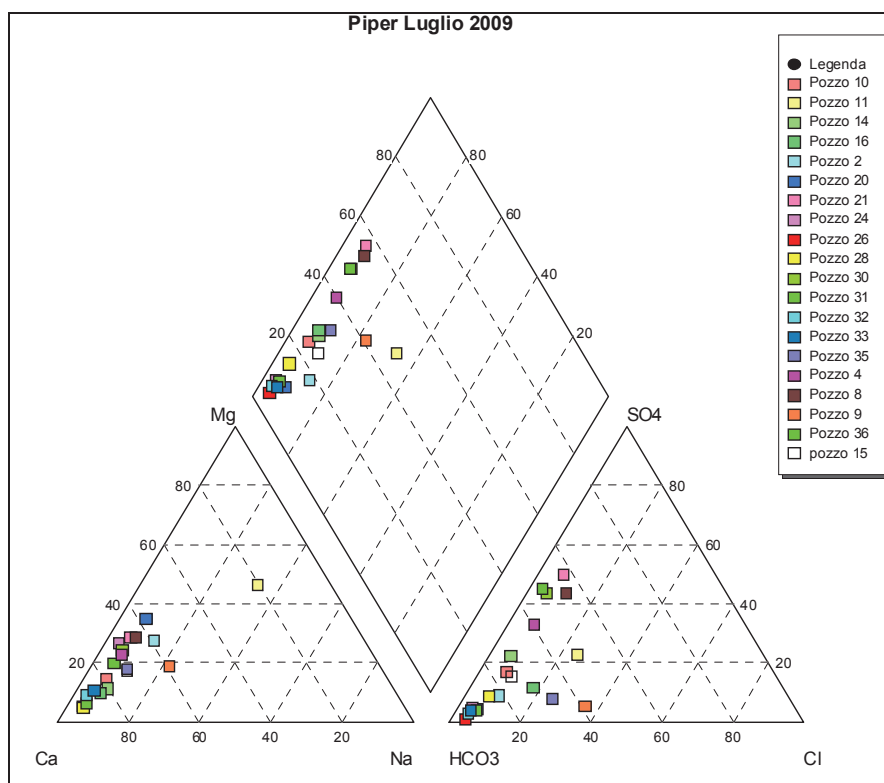


Figura - 10: Caratterizzazione chimica mediante il diagramma di Piper  
 Figure - 10: Chemical characterization using the Piper diagram

### Valutazione diretta e indiretta della risorsa idrica rinnovabile e delle riserve dell'acquifero

Per il calcolo della risorsa dinamica, si fa uso del valore che si ottiene per differenza tra lo spessore medio saturo massimo (149,13 m) e lo spessore medio saturo minimo (148,42 m), risultato essere pari a 0,71 m, che, moltiplicato per la superficie dell'acquifero con falda permanente (142,5 Km<sup>2</sup>) illustrato in Figura 12 e la sua porosità efficace, supposta pari a circa 8%, ci dà l'entità dell'acqua che può essere estratta senza provocare eccessivi squilibri al ciclo idrologico naturale e che risulta essere di circa  $8,1 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>; a questa vanno ovviamente sommati i circa  $12 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno di acqua che attualmente vengono prelevati dall'acquifero per un totale di circa  $20 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno. Tali volumi risultano accordarsi perfettamente con quelli ricavati come ricarica media annua (A.I. 1967-2006) per infiltrazione meteorica pari a circa  $21 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno (paragrafo 3).

Per quanto riguarda il valore della riserva  $W$ , essa è stata calcolata come somma di due componenti, riserve permanenti  $Wp$  + riserve regolatrici  $Wr$ . Il calcolo è stato effettuato prendendo in considerazione un valore areale di ca. 142,5 Km<sup>2</sup> che, moltiplicato per lo spessore saturo medio minimo dell'acquifero (cioè riferito alla superficie piezometrica media minima, pari a 185,92 m s.l.m.) che risulta essere pari a 148,42 metri e tenendo conto della porosità efficace (ca. 8%), definisce un volume di acqua di riserva pari a  $1,6 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>/anno, vale a dire circa 100 volte superiore alla risorsa dinamica. Questo significa che tale falda, avendo un tasso di rinnovamento molto piccolo, ha riserve talmente importanti da consentire una elevata capacità regolatrice dell'acquifero, sia annuale che pluriennale e consente di programmare l'utilizzo costante, seppure entro limiti di rinnovabilità.

### Valutazione dello sfruttamento potenziale dell'acquifero

Se parliamo in termini di uso razionale, dalla Tabella 4 è possibile evincere che dall'acquifero può essere mediamente emunta una portata complessiva di circa 0,67 m<sup>3</sup>/s senza che il sistema idrogeologico ne risulti sensibilmente alterato; questo in termini di situazione media, ma lo sfruttamento della risorsa è ovviamente legato a valori medi solo a livello pianificatorio e deve sempre confrontarsi con la naturale variabilità temporale delle risorse.

Nel caso in esame, il coefficiente di variazione  $CV$  e la deviazione standard  $SQM$  assumono, come del resto fanno tutti i parametri statistici idroclimatici, 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 certi del range in cui cadranno, con più probabilità, i prossimi valori di ricarica, bisogna fare riferimento all'intervallo 400 – 946 l/s.

Risulta evidente che i range di Tabella 4 (soprattutto quello corrispondente alla probabilità del 99%, 0,0 – 1491,8 l/s) 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 come per quanto riguarda l'eccedenza idrica illustrata in Figura 11.

Allo stato attuale (Tabella 5) non sembra esserci nessuna reale criticità relativamente allo sfruttamento dell'Acquifero carbonatico della Montagnola senese. La domanda d'acqua ai soli fini potabili sembra essere sempre soddisfatta nonostante le perdite della rete idrica relativamente alla previsione per i futuri venti anni.

Inoltre si può notare che con una risorsa media annua valutata indirettamente in circa  $21 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno in relazione ai consumi calcolati di circa  $11,7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno, risultano ancora teoricamente sfruttabili mediamente circa  $9,5 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno che praticamente sono dello stesso ordine di grandezza della risorsa rinnovabile valutata, con l'escursione dei livelli nel periodo di osservazione, in circa  $8,1 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

### Modello concettuale dell'acquifero

A conclusione dello studio è stato realizzato il modello concettuale dell'acquifero (Figura 12), dove sono stati schematizzati i limiti dell'acquifero e quantificati i volumi idrici in entrata e in uscita dallo stesso.

L'acquifero in questione, come abbiamo detto, è costituito dalle formazioni carbonatiche del Calcere Cavernoso e della Breccia di Grotti.

La raccolta, organizzazione ed interpretazione dei dati stratigrafici hanno permesso di individuare l'andamento della sua geometria: la sua estensione, affiorante e non, è pari a circa 166,3 Km<sup>2</sup> a fronte di un'area di alimentazione pari a circa 91,6 Km<sup>2</sup> ed è caratterizzata da una quota media del tetto pari a circa 256 m s.l.m. e da una quota media del substrato pari a circa 78 m s.l.m.. Mediamente l'intero complesso permeabile risulta avere uno spessore di circa 178 m.

Il calcolo del volume totale dell'acquifero risulta circa  $29,5 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup> che, a fronte di una porosità efficace dell'8%, corrisponde ad un volume di vuoti efficaci interconnessi di circa  $2,4 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>.

I dati dei pozzi raccolti mettono in evidenza che la falda è in parte libera e in parte confinata e che la superficie si presenta morfologicamente stabile durante tutto il periodo monitorato, nonostante la diversa intensità dei prelievi e delle precipitazioni meteoriche.

Tabella – 4: Variabilità statistica dei valori della risorsa idrica rinnovabile (It), in relazione all’intera area di alimentazione dell’acquifero carbonatico della Montagnola Senese e del Piano di Rosia

Table – 4: Statistical variability of the values of renewable water resources (It), in relation to the whole of the carbonate aquifer recharge area of Montagnola Senese and Piano di Rosia

|                                                    |       | Ws<br>(mm/anno) | c.i.p. | It<br>(mm/anno) | Sup.alim.<br>Km <sup>2</sup> | It<br>(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /anno) | It<br>l/s | ACQUA IMMESSA IN RETE<br>TOTALE ANNUO |                                |
|----------------------------------------------------|-------|-----------------|--------|-----------------|------------------------------|----------------------------------------------|-----------|---------------------------------------|--------------------------------|
|                                                    | Media | 257.3           | 0.9    | 231.57          | 91.6                         | 21.2                                         | 672.6     | 10 <sup>6</sup> l                     | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> |
| Valore medio                                       | CV    | 0.41            |        |                 |                              |                                              |           | 11690.2                               | 11.7                           |
|                                                    | SQM   | 112.7           |        |                 |                              |                                              |           |                                       |                                |
| Range del Valore atteso con la probabilità del 66% | max   | 370.0           | 0.9    | 325.6           | 91.6                         | 29.8                                         | 945.7     | 11690.2                               | 11.7                           |
|                                                    | min   | 144.6           | 0.9    | 137.6           | 91.6                         | 12.6                                         | 399.6     |                                       |                                |
| Range del Valore atteso con la probabilità del 99% | max   | 595.3           | 0.9    | 513.6           | 91.6                         | 47.0                                         | 1491.8    | 11690.2                               | 11.7                           |
|                                                    | min   | 0.0             | 0.9    | 0.0             | 91.6                         | 0.0                                          | 0.0       |                                       |                                |

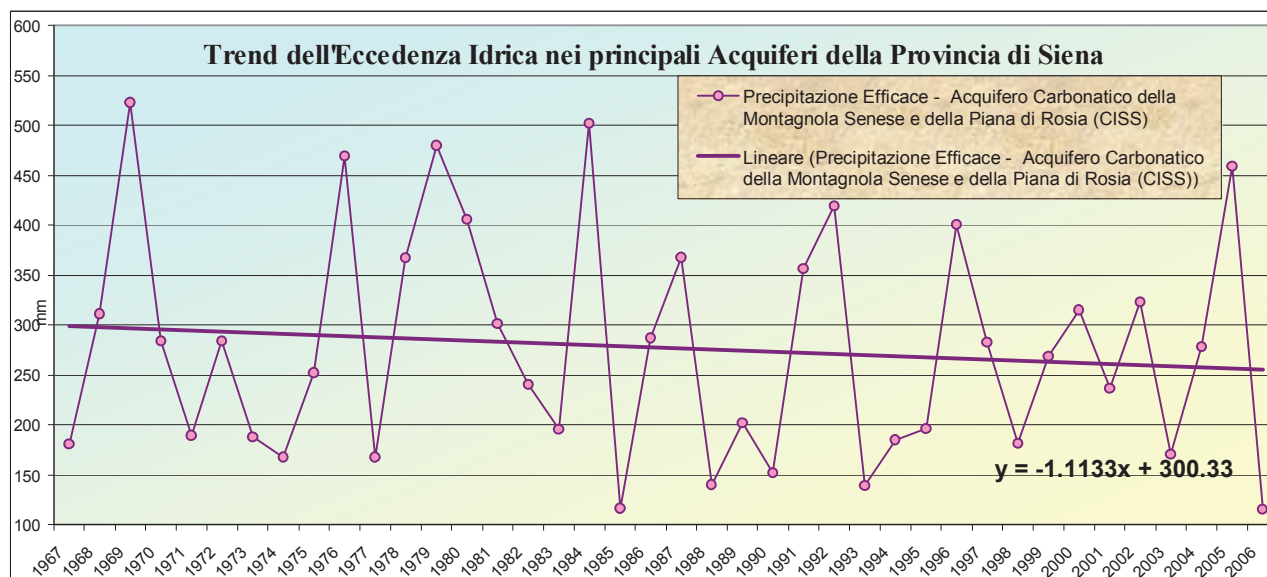


Figura – 11: Trend dell’Eccedenza Idrica (1967-2006) relativa all’Acquifero carbonatico della Montagnola Senese e del Piano di Rosia

Figure – 11: Trend of water surplus (1967-2006) of the carbonatic aquifer of Montagnola Senese and Piano di Rosia

Tabella 5 - Stima previsionale delle Piogge Efficaci 2007-2026 relativamente all’intera area di alimentazione dell’acquifero carbonatico della Montagnola Senese e del Piano di Rosia (MA: media aritmetica dei valori di eccedenza idrica dal 1967 al 2006; MAX: valore massimo di eccedenza idrica valutato nel periodo 1967-2006; SQM: scarto quadratico medio; CV: coefficiente di variazione)

Table – 5: Estimation of effective rainfall from 2007 to 2026; MAX: maximum value of water surplus of the whole of the carbonate aquifer recharge area of Montagnola Senese and Piano di Rosia (MA: arithmetic mean of the period 1967-2006; SQM: standard deviation; CV: coefficient of variation)

|                                     |                |
|-------------------------------------|----------------|
| <b>MA (mm)</b>                      | <b>277.5</b>   |
| <b>MAX (mm)</b>                     | <b>522.8</b>   |
| <b>MIN (mm)</b>                     | <b>115.4</b>   |
| <b>SQM (mm)</b>                     | <b>112.7</b>   |
| <b>CV (-)</b>                       | <b>0.406</b>   |
| <b>Trend (mm/a)</b>                 | <b>-1.1133</b> |
| <b>Previsione Pe (mm) 2007-2026</b> | <b>266.4</b>   |

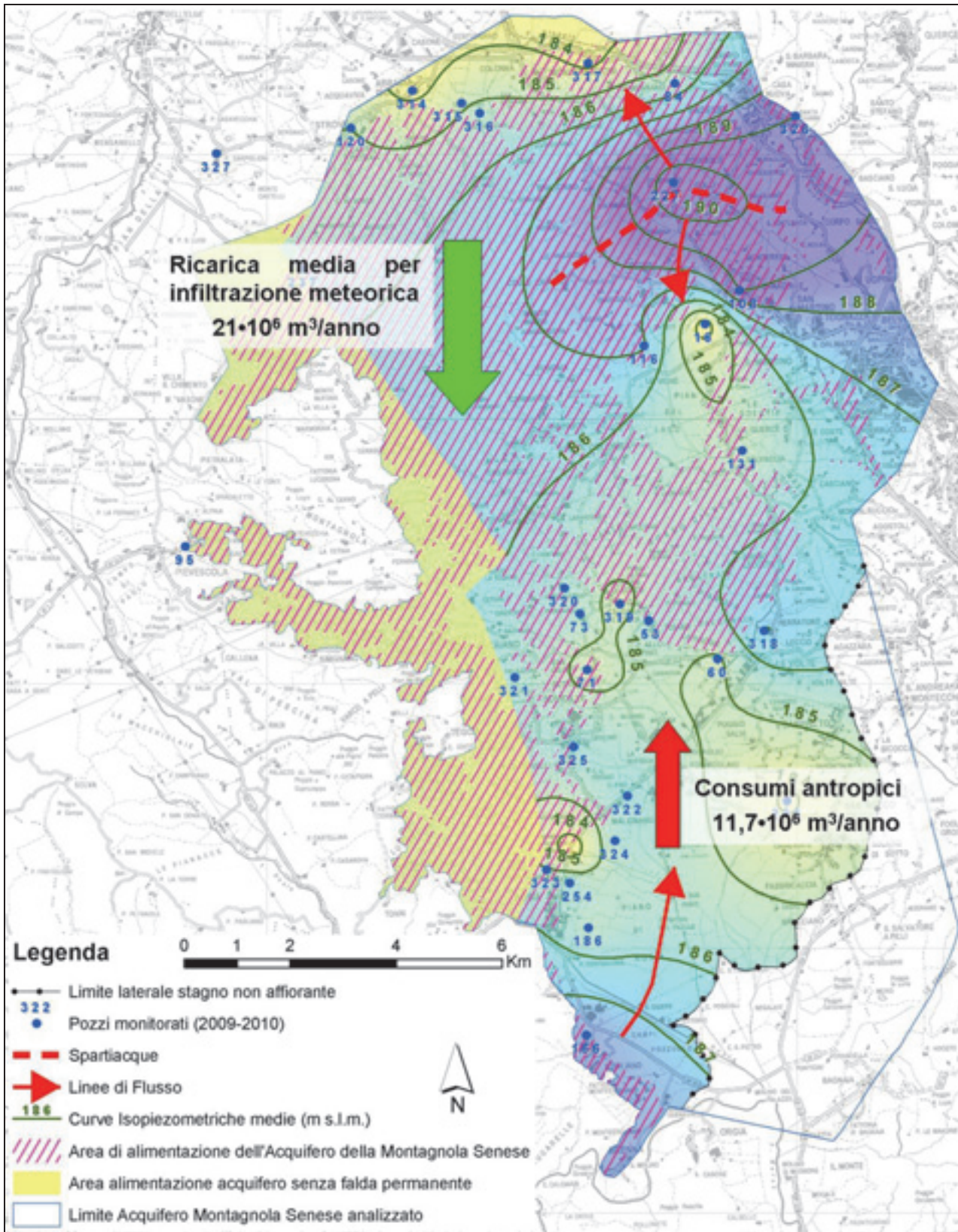


Figura – 12: Schematizzazione del modello concettuale dell'acquifero  
Figure – 12: Schematization of the conceptual model of the aquifer

Dall'analisi della superficie piezometrica, relazionata alla geometria dell'acquifero, sono stati individuati due limiti geologici, uno nella parte ovest e uno nella porzione sud-est dell'acquifero.

Il primo limite è dovuto alla presenza di una faglia orientata nord-ovest sud-est che disloca l'acquifero e individua un'area di alimentazione dell'acquifero senza falda permanente.

Il secondo limite, presente nel sottosuolo del settore sud-est dell'acquifero, coincide con la chiusura dell'acquifero. Inoltre, osservando le direzioni di flusso della falda, si è dedotto che il movimento dell'acqua avviene prevalentemente in due direzioni: verso Sud e verso Nord-Ovest. Nel settore Nord-Est è stato quindi possibile individuare uno spartiacque idrogeologico con andamento Est-Ovest.

La risorsa idrica media dell'acquifero, imputabile all'infiltrazione meteorica, valutata indirettamente, risulta pari a circa  $21 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

Per quanto riguarda il valore della riserva  $W$ , calcolata

come somma delle riserve permanenti  $Wp$  e delle riserve regolatrici  $Wr$ , esso risulta pari a  $1,6 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>/anno.

I consumi antropici sono stati valutati pari a circa  $11,7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

A conclusione dello studio si può quindi affermare che non sembra esserci nessuna reale criticità relativamente allo sfruttamento dell'acquifero carbonatico della Montagnola senese. La domanda d'acqua ai soli fini potabili sembra essere, infatti, sempre soddisfatta.

## Ringraziamenti

Gli autori ringraziano vivamente il Dott. Enrico Capezzuoli per la cortese e fondamentale collaborazione fornita nell'interpretazione stratigrafica della geologia dell'area in relazione ai risultati delle indagini precedenti e attuali finalizzata alla corretta individuazione della geometria dell'acquifero.

## Bibliografia

- Barazzuoli P., Capacci F., Migliorini J. e Rigati R., 2010. Le risorse "Geologiche" essenziali del territorio governate dal PTCP, Amministrazione Provinciale di Siena.
- Carmignani L., Decandia F.A., Disperati L., Fantozzi P., Lazzarotto A., Liotta D. & Oggiano D., 1995. Relationships between the Tertiary structural evolution of the Sardinia-Corsica-Provençal Domain and the Northern Apennines. *Terra Nova*, 7: 128-137.
- Capacci F., Migliorini J., Barazzuoli P., 2008. Studio idrogeologico dell'acquifero del Luco (Toscana, Italia). *Giornale di Geologia Applicata* 2008, 8 (1) 29-39.
- Castagnini A., 2008. Le grotte della Montagnola Senese. Commissione Speleologica C.A.I. Siena "I Cavernicoli": pp 25.
- Celico P., 1988. Prospezioni idrogeologiche. Voll. I e II, Liguori Editore, Napoli.
- Costantini A., Decandia F.A., Lazzarotto A., Liotta D., Mazzei R., Pascucci V., Salvatorini G. e Sandrelli F., 2010. Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 296 - Siena. Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico d'Italia Organo Cartografico dello Stato (Legge 68 del 2-2-1960): pp. 131.
- Decandia F.A., Lazzarotto A., Liotta D., Cernobori L., Nicolich R., 1998. The Crop 03 traverse: insights on post-collisional evolution of Northern Apennines. *Mem Soc Geol. It.* 52, 427-439.
- D'Onofrio R., A.A. 2008/2009. Analisi spaziale dell'Acquifero del "Luco" tramite prospezioni geoelettriche, Università degli Studi di Siena, (Tesi inedita).
- Liotta D., 2002. D2 asymmetric folds and their vergence meaning in the Montagnola Senese metamorphic rocks (inner Northern Apennines, Central Italy). *Journal of Structural Geology*, 24(9)(2002): 1479-1490.
- Studio di Geologia e Geofisica (S.G.G.), 1992. Studio idrogeologico della falda idrica del Luco per la sua gestione e salvaguardia. Rapporto inedito commissionato dal Comune di Siena.
- 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.