

VALUTAZIONE DELLE RISORSE IDRICHE DELL'ACQUIFERO CONTENUTO NELLE VULCANITI DEL MONTE AMIATA ATTRAVERSO CRITERI STRETTAMENTE IDROLOGICI

EVALUATION OF THE WATER RESOURCES OF THE AQUIFER CONTAINED IN THE VOLCANICS OF MOUNT AMIATA THROUGH HYDROLOGICAL CRITERIA

BARAZZUOLI PIERO*, CAPACCI FAUSTO*, GOBBINI MICHELE**
MIGLIORINI JENNY*, RIGATI ROBERTO* E BENEDETTA MOCENNI***

*Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Siena,

**Libero professionista, via Trieste 42, 53043 Chiusi (SI), michelegobbini@libero.it

***Amministrazione Provinciale di Siena, mocenni@provincia.siena.it

RIASSUNTO

Il presente studio si prefigge lo scopo di evidenziare come la valutazione delle risorse idriche dell'acquifero contenuto nelle vulcaniti del M. Amiata attraverso criteri strettamente idrogeologici, sia molto attendibile soprattutto a carattere previsionale.

Una volta definito il ciclo dell'acqua sull'apparato vulcanico, prendendo come riferimento Anni Idrologici medi all'interno di una finestra temporale che va dal 1939 al 2007, si è dapprima proceduto alla valutazione quantitativa dei parametri idroclimatici di input (corrispondente alla ricarica naturale dell'acquifero): piogge, temperature, evapotraspirazione reale, piogge efficaci e stima dell'infiltrazione totale potenziale interna per mezzo dei coefficienti di infiltrazione potenziale come porzione delle piogge efficaci; per l'area in oggetto, si è ipotizzato che l'aliquota di infiltrazione corrisponda mediamente al 90%. Successivamente, prendendo in esame lo stesso riferimento temporale, si è valutato il deflusso sotterraneo utilizzando dati reali di portata misurata alle sorgenti che emergono intorno all'apparato vulcanico.

Dopo aver affrontato separatamente le problematiche connesse alle valutazioni dell'input e output del bilancio idrogeologico, si è proceduto a verificare se tali processi sono tra loro correlati e sono stati ricavati i seguenti risultati: Infiltrazione = $50.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ e Deflusso sotterraneo = $52.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

Tali valori differiscono tra loro di soli $2.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, vale a dire meno del 5% (l'uguaglianza del bilancio idrogeologico si assume verificata ottimamente quando lo scarto tra i rispettivi valori di input e output è dell'ordine del +/-10%).

Tutti i dati trattati relativi ad infiltrazione e deflusso

sotterraneo, hanno dimostrato come le due variabili individuano un'analogia evoluzione temporale ed una netta corrispondenza dei rispettivi trend; inoltre hanno comprovato una stretta e chiara interdipendenza tra i valori dell'alimentazione meteorica e quelli del deflusso sotterraneo in uscita dall'acquifero amiatino.

ABSTRACT

The present study aims to highlight how the assessment of water resources of the aquifer contained in the volcanics of M. Amiata through hydrogeological criteria strictly, is very reliable especially in forward-looking statements.

Once defined the water cycle on the apparatus volcanic, taking as reference years Hydrological average within a window of time that goes from 1939 to 2007, it was first carried out an assessment of the quantitative hydroclimatic parameters input (corresponding to the natural recharge aquifer): rainfall, temperature, actual evapotranspiration, effective rainfall and infiltration estimated total internal potential by means of the coefficients of potential infiltration as a portion of effective rainfall, for the study area, it was assumed that the rate of infiltration corresponds on average to 90%. Subsequently, taking into consideration the same time reference, it was assessed the groundwater runoff using real data flow measured at the springs that emerge around the volcanic apparatus.

After dealing separately with problems related to the evaluations of the input and output of the water budget, we proceeded to examine whether these processes are inter-related and the following results were obtained: Infiltration = $50.1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ and groundwater runoff = $52.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$.

These values differ by only $2.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, ie less than 5% (the equality of the water budget assumes checked well

when the difference between the respective values of input and output is in the order of $\pm 10\%$. All processed data related to infiltration and groundwater runoff, have shown that the two variables identify similar temporal evolution and a clear correspondence of the respective trend, have also proven a strong and clear interdependence between the values of supply and those meteoric runoff underground output of the Amiata aquifer.

1 INTRODUZIONE

L'acquifero ospitato nelle vulcaniti del Monte Amiata è da considerarsi il più importante serbatoio idrico della Toscana Meridionale; ad esso, infatti, attingono numerosi acquedotti, che servono buona parte delle province di Siena, Grosseto e dell'alto Lazio. Ciononostante, vi si può facilmente constatare la carenza di un'adeguata e sistematica informazione idrogeologica che ne definisca le principali caratteristiche, sia sotto un punto di vista qualitativo che quantitativo. Infatti, benché il complesso vulcanico amiatino sia stato ripetutamente indagato (per fini minerari prima e geotermici poi), sono disponibili solo poche e saltuarie rilevazioni delle portate sorgive, dei livelli piezometrici e dei parametri fisico-chimici delle acque (CALAMAI et al., 1970; BONI et al., 1986; CELICO et al., 1988; CHIODINI et al., 1986; BARAZZUOLI et al., 1993, AA.VV., 2008). Il presente studio si prefigge lo scopo di evidenziare come la valutazione delle risorse idriche dell'acquifero contenuto nelle vulcaniti del M. Amiata attraverso criteri strettamente idrogeologici sia molto attendibile con l'utilizzo di idonei modelli afflussi-deflussi (anche a carattere previsionale) e pur in assenza di significativi dati stratigrafici ed idrodinamici.

2 M. AMIATA INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

L'area oggetto del presente studio si identifica con il rilievo del Monte Amiata e l'idrografia ad esso associata (fig. 1); tale rilievo, di natura vulcanica, è compreso tra le province di Siena e Grosseto e figura tra il foglio 320 (I e II quadrante) e il foglio 321 (III e IV quadrante) della nuova Carta Topografica d'Italia in scala 1:50.000.

Con i suoi 1738 m s.l.m., il vulcano quaternario del Monte Amiata si colloca nella parte centrale di un più ampio alto morfo-strutturale neogenico (Dorsale Murlo-Seggiano-Monte Amiata-Castell'azzara) che si estende in direzione NNO-SSE, attraverso i rilievi di Poggio Cerrete (502 m s.l.m.), Poggio Osticcio (624 m s.l.m.), Monte Amiata, Monte Civitella (1107 m s.l.m.) (Baldi et al., 1974); tale struttura è tagliata trasversalmente dai fiumi Orcia e Ombrone ed è bordata ad Est dal bacino neogenico di Radicofani ed ad Ovest da quello di Cinigiano.

Il basamento su cui appoggia il vulcano Amiata si è formato durante la lunga vicenda orogenetica che ha

generato l'Appennino settentrionale, in un intervallo compreso tra il Cretaceo superiore (circa 80-70 milioni di anni fa) ed i tempi nostri.

Le rocce di questo basamento appartengono a diverse Unità Tettoniche (fig. 2) derivanti da tre principali Domini Paleogeografici del vecchio oceano Tetide, che, a partire dai termini geometricamente più profondi (fig. 3), sono:

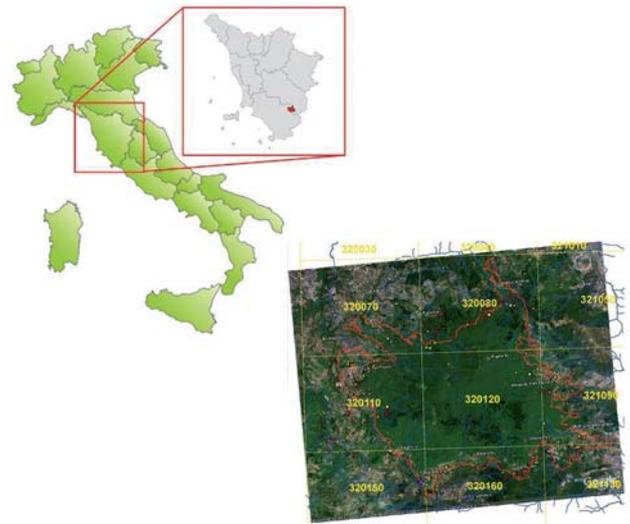


Fig. 1. Inquadramento geografico dell'area di studio – Geographical setting of the investigated area

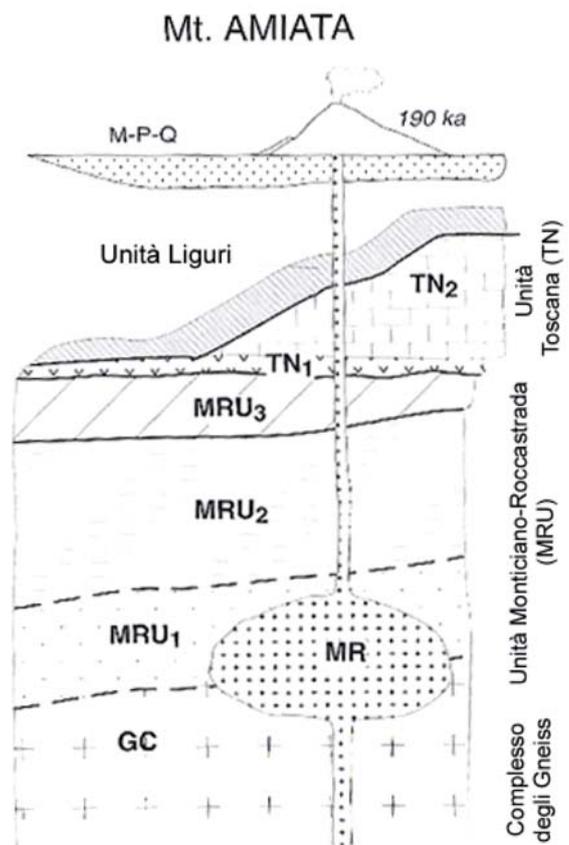


Fig. 2. Rapporti tettono-stratigrafici tra le unità tettoniche presenti nell'area geotermica del Monte Amiata (Batini et al., 2003). - Tectono-stratigraphic relationships between the tectonic units present in the geothermal area of Monte Amiata (Batini et al., 2003)

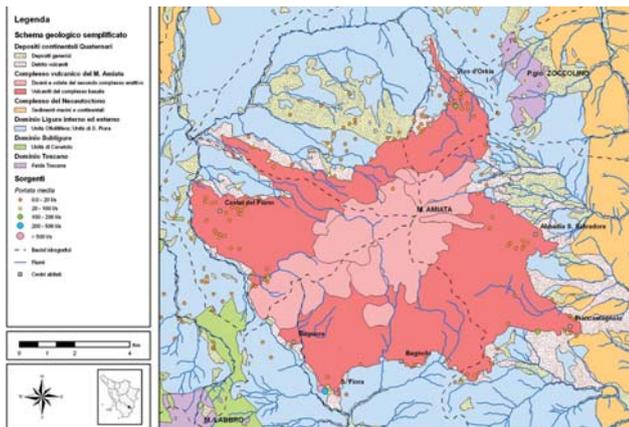


Fig. 3. Schema geologico ed idrogeologico del M. Amiata - Geological and hydrogeological setting of M. Amiata

- Dominio Toscano

Falda Toscana: rappresentata da una successione di formazioni sedimentarie carbonatiche, silicee e silicoclastiche, depostesi tra il Permiano-Trias e il Miocene basale; oggi si rinvencono nella Toscana meridionale (ed in particolare anche nell'area di studio) in affioramenti di limitata estensione, al di sotto delle Unità Liguri e delle formazioni neoautoctone.

- Dominio Subligure

Unità di Canetolo: comprendente una successione litostratigrafica a formazioni calcareo-argillitiche, calcaree e arenacee, depositatesi tra il Cretaceo superiore e l'Oligocene.

- Dominio Ligure Interno ed Esterno

Unità Ophiolitifera: è rappresentata in prevalenza da argille, argille siltose e marne, con intercalazioni di calcari silicei di colore grigio piombo, ben noti nella letteratura geologica sotto il nome di "Palombini". Oltre ai palombini compaiono intercalazioni di arenarie quarzose a cemento in parte calcareo e in parte costituito da fillosilicati; tale formazione è stata riferita al Cretaceo inferiore.

Unità di S. Fiora: costituita da formazioni sedimentarie marine silicee, calcaree, argilliti che e clastiche (arenarie e brecce), sviluppatasi tra il Giurassico fino al Terziario Inferiore.

L'apparato vulcanico è invece notoriamente costituito da rocce magmatiche effusive da molto a mediamente acide, prodotte in due successive fasi eruttive. La prima fase si è attuata intorno a 300.000 anni fa e la seconda dopo circa altri 100.000 anni. Questi stadi eruttivi hanno generato altrettanti complessi di rocce vulcaniche:

il complesso trachi-dacitico basale che costituisce gran parte dell'apparato;

il secondo complesso che comprende sia duomi e colate di lave a composizione acido-intermedia, sia due piccole colate di latiti oliviniche nei pressi della cima principale.

In posizione discordante sulle unità tettoniche sopra riportate, e forse, per brevi tratti, nella parte Occidentale, al di sotto delle vulcaniti del Complesso basale, si collocano gli estesi e potenti Depositi Neogenici raccolti nel graben di

Radicofani. Infine, su tutto riposano estese e localmente spesse coperture detritiche sensu lato (depositi colluviali, eluviali, detriti di versante, suoli, ecc.) con abbondante componente rifornita dalle vulcaniti stesse.

3 CONOSCENZE IDROGEOLOGICHE SULL'ACQUIFERO VULCANICO DEL M. AMIATA

L'acquifero vulcanico del M. Amiata occupa una superficie di circa 80,5 km² compresa all'interno di 5 bacini idrografici individuati da altrettanti corsi d'acqua (T. Senna, F. Fiora, T. Ente, T. Vivo, T. Pagliola). Esso presenta le caratteristiche più tipiche degli acquiferi fessurati, quelle per cui si manifesta il fenomeno della doppia porosità. La circolazione idrica principale avviene nel reticolo di macrofratture dove la conducibilità idraulica è notevole; poiché queste occupano un volume trascurabile dell'ammasso roccioso, anche il loro immagazzinamento è di poco conto. L'immagazzinamento è invece in prevalenza a carico della microfessurazione dell'ammasso, in cui avviene anche una circolazione molto più lenta ed estesa, simile a quella dei mezzi porosi, alla quale è possibile collegare le variazioni di erogazione idrica a ciclo più lungo (dell'ordine di diversi anni).

La geometria dell'acquifero può essere ricondotta a quella di un cono, costituito dalle vulcaniti del Monte Amiata; tali rocce vulcaniche, sovrastano un complesso flyscioide (costituito prevalentemente dalle formazioni di facies ligure s.l.) a bassa permeabilità che ne costituisce un limite geologico impermeabile. Proprio l'impermeabile di fondo è il principale motivo di condizionamento della circolazione idrica di base del Monte Amiata.

Nell'area amiatina, sono state censite oltre 200 sorgenti di cui quasi 160 (escludendo tutte le scaturigini non misurabili), sono direttamente alimentate dall'acquifero oggetto di studio.

Proprio quest'ultime sorgenti sono normalmente ubicate in prossimità del contatto tra le vulcaniti ed il sottostante complesso flyscioide di bassa permeabilità. Secondo la classica schematizzazione di CIVITA (1972), esse sono pertanto classificabili come sorgenti per soglia di permeabilità sottoposta; l'ampia coltre detritica presente ai piedi del rilievo maschera spesso tale contatto, con il conseguente manifestarsi di numerose emergenze reali al posto di quelle geologiche. Alcune sorgenti scaturiscono, poco più a monte, in corrispondenza di variazioni del grado di permeabilità delle vulcaniti (sorgenti per limite di permeabilità indefinito) o di forti depressioni morfologiche (sorgenti per affioramento della piezometrica).

Una frazione della portata erogata dall'acquifero avviene mediante piccole sorgenti ignote ed emergenze dirette negli alvei dei fiumi; essa è parte integrante del deflusso sotterraneo dell'acquifero e rappresenta quindi il flusso di base dei torrenti amiatini, costituendo a tutti gli effetti una risorsa idrica rinnovabile del M. Amiata.

Piacenza, 1 - 4 Ottobre 2014

2014 Mostra Internazionale
International Exhibition

GEO FLUID



Drilling & Foundations

20^a Mostra Internazionale delle Tecnologie
ed Attrezzature per la Ricerca, Estrazione
e Trasporto dei Fluidi Sotterranei

www.geofluid.it



Macchine ed attrezzature per indagini geognostiche
e geotecniche, fondazioni speciali



Macchine per la perforazione guidata, trivellazione orizzontale, perforazioni
direzionali, macchine spingitubo e Microtunneling



Macchine, attrezzature e strumentazioni
per la costruzione di gallerie



Strumentazioni ed attrezzature per analisi, monitoraggio ambientale,
bonifica dei terreni, idrogeologia e difesa del suolo



4 VALUTAZIONE DELLA RICARICA NATURALE DELL'ACQUIFERO (PARAMETRI DI INPUT) PER INFILTRAZIONE

Tale valutazione si è basata su evidenze di tipo idrologico con le quali si è definito il ciclo dell'acqua sull'apparato vulcanico valutando quantitativamente i relativi parametri idroclimatici: piogge, temperature ed evapotraspirazione reale, piogge efficaci e stima dell'infiltrazione (corrispondente alla ricarica naturale dell'acquifero). Tali valutazioni sono state effettuate sia su valori medi (avendo come riferimento Anni Idrologici medi all'interno di una finestra temporale che va dal 1939 al 2007), sia su valori annuali, anche al fine di analizzare le relative variabilità spazio-temporali.

La valutazione degli afflussi del territorio studiato, si è basata sulle misure effettuate in 6 stazioni climatiche (fig. 4), di cui 4 pluviotermometriche e 2 pluviometriche del Servizio Idrologico di Stato relativamente al periodo 1939-2007, per un totale di 414 anni osservati. Le varie lacune di registrazione, incontrate per vari periodi di non funzionamento di alcuni strumenti, sono state ricostruite con il procedimento delle "medie analoghe di Hann" (TONINI, 1983), operando cioè sui dati che, per l'intervallo temporale prescelto, erano invece forniti con continuità dalle altre stazioni.



Fig 4. Ubicazione delle stazioni climatiche - Location of weather stations

4.1 Precipitazioni (PTOT)

La valutazione degli afflussi medi mensili ed annui relativi al territorio studiato è stata basata sulle misure effettuate in 6 stazioni pluviometriche del Servizio Idrografico di Stato. I dati così ricavati per le varie stazioni di misura hanno permesso di ricostruire un regime caratterizzato da massimi nei mesi che vanno da Ottobre a Novembre e minimi nei mesi estivi con altezze d'acqua che variano da circa 30 mm a 216 mm.

Per la valutazione delle precipitazioni medie sull'intero

acquifero nei vari anni, si è adottato il noto metodo dei topoieti (Thiessen, 1911).

I risultati di tali elaborazioni sono visibili in Fig. 5 in cui si nota come nel periodo compreso tra il 1936 e il 2007 il tasso di variazione pluviometrica sia negativo, con un decremento pari a circa -6,15 mm/anno.

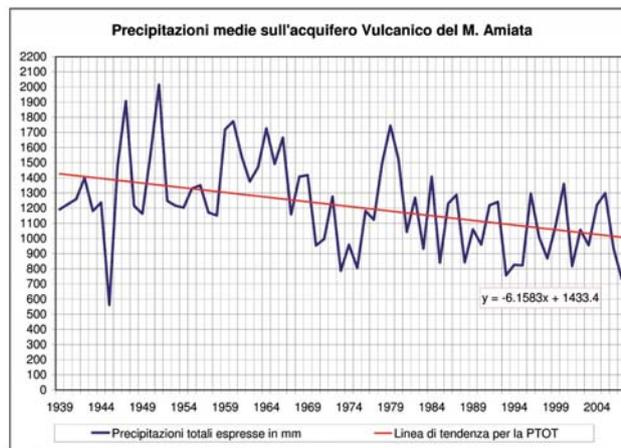


Fig 5. Grafico delle variazioni di precipitazione (espressi in mm) sull'acquifero vulcanico del M. Amiata attraverso il metodo dei topoieti (Thiessen, 1911) - Graphic of changes in precipitation (in mm) on the aquifer volcanic M. Amiata through the method of topoieti (Thiessen, 1911)

4.2 Temperature

La valutazione delle temperature medie mensili ed annue, relative alla zona considerata, si è basata sui dati registrati in 4 stazioni termometriche del Servizio Idrografico di Stato per un totale di 276 anni osservati. Le lacune di registrazione, incontrate per vari periodi di non funzionamento di alcuni strumenti, sono state colmate con il suddetto procedimento delle "medie analoghe di Hann" (TONINI, 1983); tali lacune riguardano complessivamente 107 anni, pari al 38,8 % del totale.

Sulla base di questi dati è stata effettuata la ricostruzione dei valori medi di temperatura in corrispondenza delle stazioni pluviometriche mancanti di termometro, attraverso l'adozione di un modello termometrico basato sulla variazione lineare della temperatura (T) in funzione della quota (H). Applicando questa metodologia di calcolo ai valori di temperatura e quota delle stazioni, sono state ottenute 69 equazioni di regressione (una per ogni anno del periodo considerato) con le quali è stato possibile stimare i valori di temperatura media annua per le stazioni mancanti di termometro (Vivo d'Orcia e Casello del Guardiano).

Operando quindi con la metodologia di Thiessen già ricordata nel paragrafo precedente, si è proceduto alla valutazione delle temperature medie sull'intero acquifero nei vari anni.

I risultati finali (Fig 6) mostrano come nel periodo compreso tra il 1936 e il 2007 il tasso di variazione termometrico sia abbastanza costante con un leggero decremento pari a circa -0.002 °C/anno.

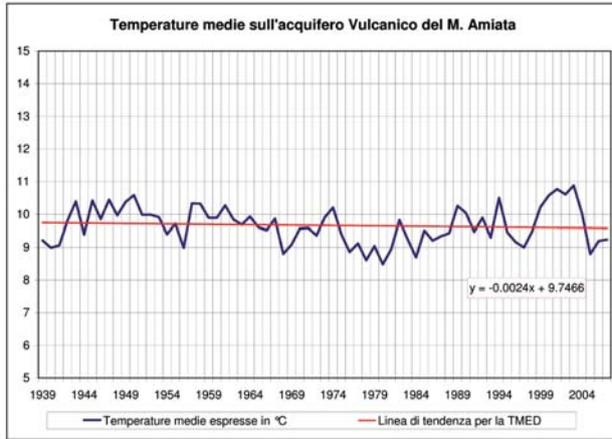


Fig 6. Grafico delle variazioni di temperature (esprese in °C) sull'acquifero vulcanico del M. Amiata attraverso il metodo dei topoi (Thiessen, 1911) - Graphic of changes in temperature (in °C) on the aquifer volcanic M. Amiata through the method of topoi (Thiessen, 1911)

4.3 Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione reale (ER) sull'intero acquifero nei vari anni, è stata valutata sulla base della nota formula del Turc (Turc, 1954), in questo caso pari a:

$$Er = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

dove P rappresenta la precipitazione annua ed L è un parametro funzione cubica della temperatura media annua T, espressa in °C:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

I risultati finali (Fig 7) evidenziano che, nel periodo compreso tra il 1936 e il 2007, il tasso di variazione dell'evapotraspirazione reale sia in diminuzione con un leggero decremento pari a circa -0.56 mm/anno.

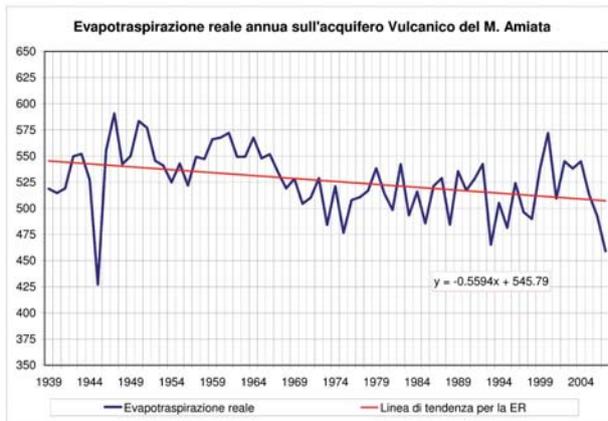


Fig 7. Grafico delle variazioni dell'evapotraspirazione reale (esprese in mm/annui) sull'acquifero vulcanico del M. Amiata. - Graphic of changes in actual evapotranspiration (in mm / year) on the aquifer volcanic M. Amiata

4.4 Piogge efficaci

Le precipitazioni efficaci (Pe), che rappresentano la risorsa idrica totale naturale potenziale rinnovabile, sono state

ovviamente calcolate annualmente con la semplice differenza:

$$Pe = P - Er$$

I risultati finali (Fig 8) mostrano che il tasso di variazione delle piogge efficaci, nel periodo compreso tra il 1936 e il 2007, sia in notevole diminuzione con un decremento pari a circa -5.6 mm/anno.

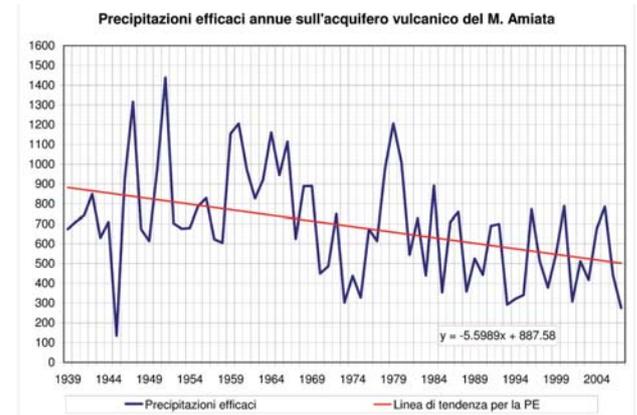


Fig 8 - Grafico delle piogge efficaci (esprese in mm/annui) sull'acquifero vulcanico del M. Amiata - Graphic of effective rainfall (in mm / year) on the aquifer volcanic M. Amiata

4.5 Infiltrazione in vari A.I.

Una volta valutati i valori annui dei principali parametri del bilancio (precipitazione, temperature, evapotraspirazione reale, precipitazione efficace), l'infiltrazione totale potenziale interna (Iti) è stata calcolata per mezzo dell'uso dei cosiddetti coefficienti di infiltrazione potenziale (Celico, 1988) che consentono di valutare l'infiltrazione annua come porzione del PE (Fig 9), variabile a seconda del tipo litologico costituente l'area di alimentazione e quindi in funzione del suo grado di permeabilità relativa. Per l'area in oggetto, costituita da vulcaniti quaternarie dotate di un elevato grado di permeabilità dovuto a fessurazione, si è ipotizzato che l'aliquota di infiltrazione corrisponda mediamente a 90% del relativo PE, cioè:

$$I_{ti} = PE \cdot 0,90$$

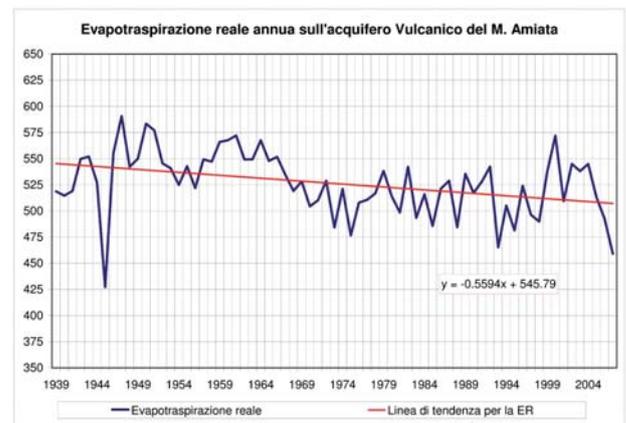


Fig 9. Grafico dell'infiltrazione totale interna (esprese in 106 .m3/annui) sull'acquifero vulcanico del M. Amiata - Graphic total internal infiltration (expressed in 106 .m3/year) on the aquifer volcanic M. Amiata

La scelta di utilizzare un così alto coefficiente di infiltrazione è stato dettato non solo dalla notevole capacità ricettiva del mezzo, ma anche dalla presenza di una fitta copertura boschiva che, rallentando notevolmente i deflussi superficiali, favorisce l'infiltrazione.

5 VALUTAZIONE DEL DEFLUSSO SOTTERRANEO DELL'ACQUIFERO (PARAMETRI DI OUTPUT)

Prendendo come riferimento temporale l'Anno Idrologico medi 1939 – 2007, si è quindi valutato il deflusso sotterraneo utilizzando dati reali di portata misurata alle sorgenti (captate e non), che emergono intorno all'apparato vulcanico.

Poiché però la sorgente Ermicciolo, è l'unica che dispone di misure pressoché continuative di portata (a cadenza mensile) per un lungo arco di tempo (dal 1939), mentre di tutte le altre manifestazioni sorgive sono disponibili solo misure saltuarie, anche se talvolta relative a più anni, la mancanza del dato misurato è stato colmato tramite l'utilizzo dei cosiddetti *coefficienti medi di correlazione* (BARAZZUOLI & SALLEOLINI, 1994a e BARAZZUOLI *et al.*, 1995b). Sono stati dunque rapportati i valori di portata della sorgente Ermicciolo (l'unica ad avere valori di portata realmente misurati per un ampio arco temporale) con quelli di tutte le altre sorgenti amiatine (un esempio è visibile in Fig 10), purché misurate nello stesso periodo ed il cui valore di portata fosse risultato significativo.

La relativa costanza dei valori delle serie di coefficienti ha chiaramente indicato l'esistenza di una legge di propor-

Data della misura	Portate Misurate		Rapporti	
	Burlana Q ₁ (l/s)	Ermicciolo Q ₂ (l/s)	Coefficienti	
			Q ₁ /Q ₂	medio
giu-39	48,0	190,0	0,253	
nov-39	36,0	209,0	0,172	0,21
apr-51	67,2	277,0	0,243	
giu-51	59,0	303,0	0,195	
lug-51	65,0	294,0	0,221	
ago-51	58,2	281,0	0,207	
set-51	53,5	262,0	0,204	
nov-51	51,3	234,0	0,219	
dic-51	32,0	219,0	0,146	0,205
gen-52	45,0	206,0	0,218	
apr-52	46,0	185,0	0,249	
mag-52	37,0	183,0	0,202	
giu-52	35,0	179,0	0,196	
lug-52	34,0	175,0	0,194	
ott-52	32,0	164,0	0,195	
dic-52	34,0	150,0	0,227	0,212
gen-53	35,0	150,0	0,233	
mar-53	26,0	150,0	0,173	
apr-53	28,0	150,0	0,187	
mag-53	35,0	152,0	0,230	
giu-53	29,0	154,0	0,188	
set-53	37,0	158,0	0,234	
dic-53	32,0	155,0	0,206	0,208
Coefficiente medio sorgente Burlana			0,209	

Fig 10. Esempio di calcolo del coefficiente di correlazione tra l'Ermicciolo ed un'altra sorgente amiatina (Barazzuoli & Salleolini, 1994a) - Example of calculation of the correlation coefficient between the Ermicciolo and another spring (Barazzuoli & Salleolini, 1994a)

zionalità che lega le portate dell'Ermicciolo a quelle scaturite dalle altre sorgenti e, di conseguenza, al deflusso totale in uscita dall'acquifero; pertanto, una volta ricavati i coefficienti medi di correlazione tra le portate dell'Ermicciolo e quelle di tutte le altre sorgenti (per un totale di oltre 1500 rapporti), questi sono stati utilizzati per determinare l'entità del suddetto deflusso relativamente a tutti gli anni che vanno dal 1939 al 2007 (un esempio di tali elaborazioni è riportato in Fig 11)

codice	NOME SORGENTE	Coefficienti medi (OSOR/GER) 1939-2007
Ermicciolo		
1	ACQUE ARBURE	0.662
2	POLLE FLAMINI	0.052
3	BUGNANO	0.397
18	SAMBUCA	0.006
19	ACQUE GIALLA	0.026
23	FORTE DELL'ORO	0.018
35	SERAGIO	0.073
55	GALLERIA VIII	0.022
60	PASTORE	0.021
63	FOSSO CANALI I*	0.022
65	INDOVINA	0.093
68	POLVERIERA	0.104
69	SENZA NOME (Piancastagn.)	0.082
72	MUGNELLO	0.146
73	FORTE NATALI	0.011
75	VENA VECCHIA	0.552
82	GASTELLACCIO	0.010
86	LA BUCA	0.005
88	PESCHIERA	0.640
89	CAROLINA	0.225
99	FORTE CANALI	0.022
114	ENTE	0.423
117	ACQUA BONA	0.027
120	MONISTALDO	0.120
138	FORTE MURATA	0.081
139	FORTE BOLLETTA	0.047
148	FUSAIO	0.049
149	BURLANA	0.209
153	FIORA*	fino al 1966 3.979 dal 1967 7.031
		ALTRE SORGENTI** 1.539
COEFFICIENTE MEDIO ACQUIFERO		fino al 1966 9.96 dal 1967 13.07

(*) Con questo termine è considerato il valore di portata cumulata tra la "Galleria Nuova", la "Galleria Bassa" e la "Galleria Alta".
(**) Con questo termine è considerato l'insieme di tutte quelle emergenze per le quali erano disponibili pochissimi dati di portata; tale scarsità non ha consentito di valutarne un coefficiente per ogni anno. Questi singoli dati sono stati accorpatis e confrontati, allo stesso modo delle altre sorgenti, con quelle relative all'Ermicciolo (tramite medie semplici).

Fig 11. Risultati ottenuti nella valutazione dei coefficienti per le sorgenti esaminate e per l'intero acquifero relativamente all'anno idrologico 1939-2007. - Results obtained in the evaluation of the coefficients for the springs considered, and for the aquifer relatively hydrological year 1939-2007

è stato così ricavato anche un coefficiente medio (Cr) tra la portata complessiva dell'acquifero amiatino e quella dell'Ermicciolo: esso è risultato pari a 9,96 per gli anni anteriori al 1967 ed a 13,07 per il periodo successivo. L'uso di due coefficienti annui relativi a due diversi periodi è dovuto al fatto che la sorgente Fiora (in particolare "Galleria Nuova") è stata soggetta, negli anni '60, a lavori di miglioramento dell'impianto di captazione: ne è derivato un cospicua aumento della sua portata media ed è quindi sensibilmente variato anche il relativo coefficiente di correlazione con l'Ermicciolo (da 3,98 a 7,03, rispettivamente, prima e dopo detti lavori).

6 CORRELAZIONI TRA INPUT ED OUTPUT

Dopo aver affrontato separatamente le problematiche connesse alle valutazioni dell'Infiltrazione e del Deflusso sotterraneo (rispettivamente input e output del Bilancio idrogeologico), partendo da dati e con criteri completamente diversi, si sono potuti ricavare i valori medi per l'A.I. 1939-2007 (Fig 12).

STATISTICHE	Iti CIP	Dsot (2 coef)
PERIODO 1939-2007	$m^3 \cdot 10^6 / \text{anno}$	$m^3 \cdot 10^6 / \text{anno}$
N (-)	69	69
MA (mm; °C)	50,1	52,4
SQM (mm; °C)	19,7	12,6
CV (-)	0,39	0,2
SQMMR (%)	4,7	3,0%

Fig 12. Confronto tra i valori medi (A.I. 1939-2007) di infiltrazione (Iti CIP) e deflusso sotterraneo (Dsot-2coef) e relativi parametri statistici. - Comparison between the mean values (AI 1939-2007) infiltration (Iti CIP) and groundwater runoff (Dsot-2coef) and statistical parameters

I due parametri differiscono tra loro di soli 2,4 $m^3 \cdot 10^6 / \text{anno}$, vale a dire meno del 5% (l'uguaglianza è verificata ottimamente quando lo scarto tra i rispettivi valori di input e output è dell'ordine del +/-10% - Celico, 1988). E' dunque lecito affermare che esiste una sostanziale rispondenza tra i valori di deflusso sotterraneo così valutati e le corrispondenti entità di infiltrazione (ricarica) dell'acquifero, così come dimostra anche l'analisi effettuata su vari A.I. come riportato in Figg. 13 e 14.

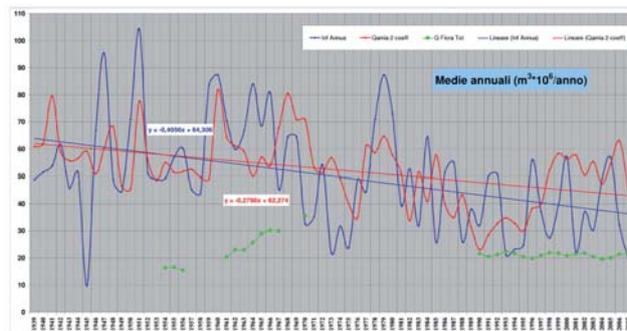


Fig 13. Andamento dei valori annuali di infiltrazione (InfAnnia) e di deflusso sotterraneo (Qamia) e relativi trends. - Performance of annual values of infiltration (infAnnia) and groundwater runoff (Qamia) and related trends

Valori in $m^3 \cdot 10^6$	Infiltrazione Medi a annua (Inf)	Deflusso sotterraneo medio annuo (Ds=Qamia 2 coef)	Differenze Ds-Inf
A.I. 1939-2007	50	52	+2
A.I. 1949-2007	50	50	-
A.I. 1959-2007	48	50	+2
A.I. 1969-2007	42	47	+5
A.I. 1979-2007	42	44	+2
A.I. 1989-2007	37	42	+5

Fig 14. Confronto tra i valori medi, relativi a vari anni idrologici, tra infiltrazione e deflusso sotterraneo. - Comparison of the mean values, related to various hydrological years, including infiltration and groundwater runoff

Anche le correlazioni tra Infiltrazione e Deflusso sotterraneo con valori lisciati (medie mobili di vario ordine) definiscono, per medie mobili di ordine 20 una correlazione tra i due parametri ottima risultando, per questa, un coefficiente di correlazione $r^2 = 0.81$ (Fig.15) che diviene, per medie mobili di ordine 30 una correlazione tra quasi perfetta risultando per questa un coefficiente di correlazione $r^2 = 0.99$ (Fig.16).

7 CONCLUSIONI

Tutti i dati trattati relativi ad infiltrazione e deflusso sotterraneo, hanno dimostrato come le due variabili individuano un'analogia evoluzione temporale ed una netta

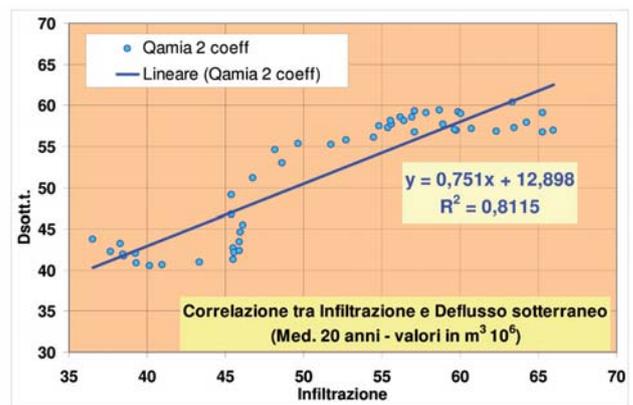


Fig 15. Correlazione tra le medie mobili, di ordine 20, di infiltrazione e deflusso sotterraneo. - Correlation between the moving averages, order 20, infiltration and groundwater runoff

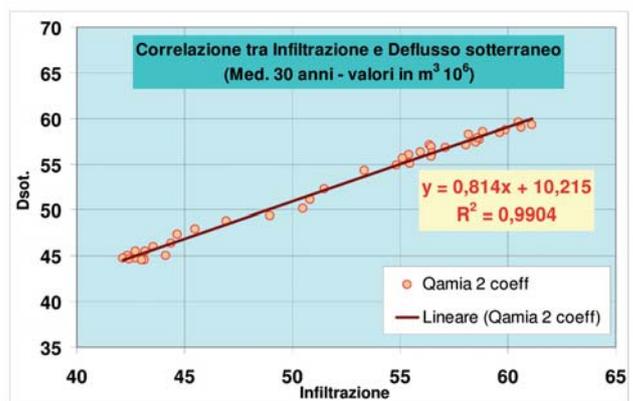


Fig 16. Correlazione tra le medie mobili, di ordine 30, di infiltrazione e deflusso sotterraneo. - Correlation between the moving averages, Order 30, infiltration and groundwater runoff

corrispondenza dei rispettivi trend; inoltre l'alto ed altissimo grado di correlazione statistica tra variabili diversamente valutate (infiltrazione e deflusso sotterraneo) e/o misurate (misure sistematiche di lungo periodo delle portate della sorgente Ermicciolo, di medio periodo delle portate della sorgente Fiora, misure saltuarie delle restanti 150 sorgenti amiatine) hanno comprovato, pur con i limiti connessi alla diversa densità di dati misurati, una stretta e chiara interdipendenza tra i valori dell'alimentazione meteorica e quelli del deflusso sotterraneo in uscita dall'acquifero amiatino.

Considerando una superficie di affioramento delle vulcaniti di circa 80,5 Km² ed una ricarica media annua di circa $50 \cdot 10^6 m^3 / \text{anno}$, sarebbe ragionevole supporre che questa induce una variazione media della superficie piezometrica di ca. 6-7 m. Tale dato è confermato dalla variazione piezometrica direttamente misurata all'interno del piezometro di poggio Trauzzolo tra il Maggio 2010 (784,40 m s.l.m.) ed il Gennaio 2011 (793 m s.l.m.) che è risultato, a seguito di un periodo particolarmente piovoso e nevoso, pari a circa 9m (Fig.17).

Se la situazione individuata dal piezometro di Poggio Trauzzolo potesse considerarsi paradigmatica per tutto l'apparato vulcanico amiatino, nell'acquifero in esso

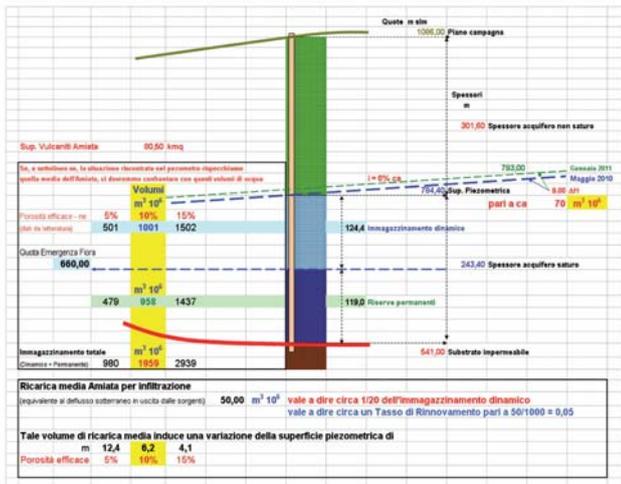


Fig. 17. Elementi idrogeologici significativi ipotizzabili sulla base delle evidenze rilevate nel piezometro di Poggio Trauzzolo nel periodo Maggio 2010-Giugno 2011. - Elements hydrogeological significant on the basis of the evidence recorded in the piezometer Poggio Trauzzolo in the period May 2010-June 2011

ospitato, supponendo una porosità efficace pari al 10% e facendo riferimento alla quota di emergenza della sorgenti di S. Fiora, avremmo, per quel riferimento temporale:

- un immagazzinamento totale pari a $1,9 \cdot 10^9$ m³ che si ripartisce in:
 - a) immagazzinamento dinamico pari a $1 \cdot 10^9$ m³, (risorsa dinamica di $70 \cdot 10^6$ m³ e riserva regolatrice di $950 \cdot 10^6$ m³);
 - b) riserva permanente pari a $958 \cdot 10^6$ m³.

Dato che, con riferimento all'anno idrologico medio, si è valutata una risorsa dinamica di ca. $50 \cdot 10^6$ m³, essa andrebbe a corrispondere a circa 6-7 m di fluttuazione della superficie piezometrica. In pratica una variazione di piezometria dello stesso ordine di grandezza rilevato nel piezometro (9 m, avvenuto in concomitanza di un periodo particolarmente piovoso e nevoso) a conferma dell'attendibilità dei risultati ottenuti con il presente studio. Una valutazione ulteriore dell'importanza di questo corpo idrico sotterraneo viene dall'analisi dei fabbisogni documentati dall'AATO 6 (Fig. 18) che indica al 2026 un consumo totale di acqua di circa $40 \cdot 10^6$ m³/anno (al netto delle perdite di rete) che è ampiamente sostenuto dal deflusso idrico sotterraneo dell'acquifero del Monte Amiata. Ad oggi l'acquifero del monte Amiata non mostra

particolari criticità a livello quantitativo, in quanto, la variazione delle portate delle sorgenti è in stretta correlazione con la naturale variabilità degli apporti di ricarica meteorica per infiltrazione.

Tipologia di consumo	mc. fatturati 2007	mc. fatturati 2017	mc. fatturati 2026
Usi domestici	23.184.486	25.912.072,7	28.639.659,3
altri usi	6.955.346	7.773.621,81	8.591.897,79
fluttuanti	2.896.800	2.982.000	3.067.200
Fuori ambito	1.300.000	0	0
Totale	34.336.632	36.667.694,51	40.298.757,09

Consumi idrici fatturati all'interno dell'AATO 6 Ombrone

Fig. 18. Consumo reale (fatturato) dell'acqua immessa nella rete acquedottistica alimentata anche dall'acquifero amiatino (Fonte AATO 6 – Ombrone). - Real consumption (sales) of the water fed into the water supply network fuelled from Amiata acquifer (Source AATO 6 - Ombrone)

Bibliografia

AA.VV. Studio Geostrutturale, Idrogeologico e Geochimico Ambientale dell'area amiatina – Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Siena, 2008.
 BARAZZUOLI P., RAPPUOLI D. & SALLEOLINI M. (1995b) - Identification and comparison of perennial yield estimation models using Mt. Amiata aquifer (southern Tuscany) as an example. Environmental Geology, 25 (2), 86-99.
 BARAZZUOLI P. & SALLEOLINI M. (1994a) - Modelli di valutazione della risorsa idrica rinnovabile del M. Amiata (Toscana meridionale). Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora Ed., Bologna, 2; pp. 171-185.
 BARAZZUOLI P., GUASPARRI G. & SALLEOLINI M. (1993) - Il clima. In: "La storia naturale della Toscana meridionale", Pizzi Editore, Milano; pp. 141-171.
 BAZZURRO F., CHIODINI G., GIAQUINTO S., MATTIOLI B. & ZANZARI A. (1986) - Metodologie idrogeologiche ed idrogeochimiche applicate alla prospezione geotermica: stima del flusso di calore nell'area del M. Amiata. CNR-PFE, SPEG, SI-4, Roma; pp. 307-350.
 BONI C.F., BONO P. & CAPELLI G. (1986) - Schema idrogeologico dell'Italia centrale. Mem. Soc. Geol. It., 35; pp. 991-1012.
 CALAMAI A., CASTALDI R., SQUARCI R., TAFFI L. (1970) - Geology, geophysics and hydrogeology of the Monte Amiata geothermal fields: I-Maps and comments, Geothermics, special issue, 1; pp. 1-11.
 CELICO P. (1988) - Prosperezioni 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; pp. 73-130.
 CIVITA M. (1972) - Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di presa. Mem. e Note Ist. Geol. Appl. Napoli, 12; pp. 1-34.
 THIESSEN A.H. (1911) - Precipitation average for large areas. Montly Wather Rev.
 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 precipitations, l'évaporation et l'écoulement. La Houille blanche, 3 journées de l'hydraulique de la Société Hidrotechnique de France, Paris; pp. 36-44.



GALILEO GEOFISICA

- Sismica a rifrazione (onde P, Sh, Tomografia sismica)
- Indagini Down-Hole
- Indagini sismiche con metodologia MASW e HVSr
- Microzonazioni sismiche
- Tomografie elettriche fino a 620 metri
- Indagini S.E.V. fino a 1000 metri
- Misurazioni del potenziale spontaneo
- Georadar
- Prove penetrometriche statiche/dinamiche pesanti e leggere



Dott. SIMONE SECCI
 Dott. LORENZO BATTI

loc. Ponte alla Chiassa 293, Arezzo

3939097089 - 3383680385
 galileogeofisica@gmail.com
 www.galileogeofisica.it

attivi nel campo della Geofisica dal 2002