

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA
"LA SAPIENZA"

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI



DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA

**IDROGEOLOGIA DEL MEDIO E ALTO
FIUME ANIENE**

(Monti Simbruini, Lazio)

CARLO PERCOPO

docente guida: PROF. *PAOLO BONO*

RIASSUNTO

Da oltre un decennio ricercatori del Dipartimento di Scienze della Terra conducono ricerche idrogeologiche sull'idrostruttura simbruino-ernica, allo scopo di migliorare le conoscenze sulle modalità di circolazione sotterranea negli acquiferi fessurati e carsificati.

In tale programma di iniziative scientifiche si inserisce il lavoro di tesi, dedicato alla dinamica della circolazione sotterranea ed in particolare alla risposta dell'acquifero carsico simbruino-ernico al regime delle precipitazioni.

Per l'assetto geologico-strutturale, idrogeologico, geomorfologico, vegetazionale e climatico, l'area di indagine assume caratteristiche di rappresentatività nell'ambito degli acquiferi carsici regionali della catena appenninica. Le problematiche affrontate vengono presentate a differenti scale di osservazione sulla base dei metodi di indagine prescelti.

Studi idrogeologici a scala regionale, condotti nell'area nord-occidentale della dorsale carbonatica simbruino-ernica, hanno permesso di precisare le condizioni ai limiti dell'idrostruttura carsica ed i rapporti con le principali unità idrogeologiche adiacenti.

In questo ambito, le caratteristiche idrodinamiche, chimico-fisiche ed isotopiche delle sorgenti basali dell'acquifero simbruino, localizzate in riva destra del Fiume Aniene (Gruppo sorgivo di Agosta s.l.) sono state messe a confronto con quelle delle sorgenti di Marano Equo - Anticoli Corrado, ubicate in riva sinistra dell'Aniene al piede dei Monti Ruffi settentrionali.

Dalle analisi condotte deriva un'origine comune delle sorgenti basali del medio Aniene, alimentate dalla falda in rete che satura l'acquifero carsico simbruino. In particolare, il gruppo di sorgenti compreso tra Marano Equo ed Anticoli Corrado riceve significativi contributi di fluidi gassosi di origine profonda (CO_2 , H_2S).

A nord-ovest delle sorgenti di Agosta, il Torrente Bagnatore, tributario in riva destra dell'Aniene, identifica il limite di potenziale della falda carsica regionale più prossimo alla catena sabina e con direzione parallela alla linea Olevano-Antrodoco.

Misure di portata condotte periodicamente in differenti sezioni seriate lungo il Bagnatore nel periodo 1996-1997, hanno precisato che esso riceve contributi da sorgenti sia lineari che localizzate per complessivi $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$. Analisi chimico-fisiche ed isotopiche delle acque del torrente e di alcune sorgenti ubicate nei pressi dell'alveo, fanno ritenere che il Bagnatore sia alimentato nel tratto finale del suo corso, dalla falda regionale che satura l'idrostruttura simbruina e che alimenta, a quote di poco inferiori, le sorgenti di Agosta s.l.

Ricerche ad una scala di maggior dettaglio sono state condotte nel bacino dell'alto Aniene, con sezione di chiusura a Subiaco (365 m) e superficie di 216 Km^2 . Le analisi climatica ed idrologica dell'alto Aniene mettono in evidenza una diversa valutazione della superficie del

bacino idrogeologico rispetto a quello imbrifero. Viene definito, inoltre, un quadro di dettaglio del regime di flusso del sistema idrografico aniese e dei suoi principali tributari, Simbrivio, Fosso Campo - Fosso dell'Obaco.

Dal monitoraggio periodico della portata in differenti sezioni del reticolo idrografico, vengono precisati i rapporti idraulici tra l'acquifero carsico regionale ed il Fiume Aniene, nelle condizioni sia di morbida che di esaurimento.

Lo studio idrodinamico e chimico-fisico delle acque di una delle più rappresentative sorgenti dell'area simbruina, la sorgente Inferniglio, permette di analizzare nel dettaglio le modalità di circolazione sotterranea nel sistema fessurato e carsificato, evidenziando, in particolare, il ruolo dell'epicarso nei meccanismi di alimentazione dell'emergenza e nelle variazioni di chimismo delle acque sorgentizie.

Dall'analisi di eventi critici di flusso, vengono discriminate le diverse componenti che determinano la portata della sorgente, coerentemente con un modello di circolazione caratteristico di un sistema carsico gerarchizzato.

La ricerca sulla dinamica di circolazione nei sistemi carsici dell'alto Aniene si completa con l'analisi dei processi di precipitazione della calcite da acque naturali, alla emergenza Tartare, situata nei pressi della sorgente Inferniglio. La sperimentazione, condotta in collaborazione con ricercatori dell'Università di Brema, si basa sulla determinazione diretta del tasso di precipitazione di CaCO_3 e sul confronto con i dati teorici calcolati secondo modelli geochimici.

Parole chiave: *Idrogeologia carsica - Idrostruttura simbruino-ernica - Regime Fiume Aniene - Idrogrammi di portata - Struttura dell'acquifero carsico - Idrochimica.*

INDICE

RIASSUNTO	2
Premessa.....	4
Idrogeologia dei Monti Simbruini.....	1
1.1. Introduzione	1
1.2. Definizione dell'area di indagine.....	2
1.3. Inquadramento geologico regionale.....	4
<i>1.3.1. Domini di sedimentazione.....</i>	<i>4</i>
1.3.1.1. Dominio di Piattaforma carbonatica	5
1.3.1.1.1 Principali unità litostatigrafiche.....	6
1.3.1.2. Dominio di transizione sabino.....	7
1.4. Sintesi degli studi geochimici precedenti.....	9
1.5. Presentazione dei dati	13
<i>1.5.1. Unità fisiografica del medio Aniene - Torrente Bagnatore.</i>	<i>14</i>
1.5.1.1. Descrizione dei campioni analizzati.....	14
1.5.1.2. Presentazione dei dati e discussione.....	17
1.5.1.2.1 Salinità, temperatura e ione bicarbonato.....	17
1.5.1.2.2 Diagramma di reazione percentuale.....	19
1.5.1.2.3 rCa/rMg.....	21
1.5.1.2.4 Dati isotopici ($\delta^{18}\text{O}$)	22
1.5.1.3. Bacino del Torrente Bagnatore.....	24
<i>1.5.2. Unità fisiografica dell'alto Aniene - alto Liri</i>	<i>26</i>
1.5.2.1. Diagramma di reazione percentuale.....	26
1.5.2.2. rCa/rMg.....	28
1.5.2.3. Dati isotopici ($\delta^{18}\text{O}$).....	31
<i>1.5.3. Unità fisiografica della Piana del Cavaliere</i>	<i>33</i>
1.6. Considerazioni conclusive.....	34
<i>1.6.1. Sorgenti di Agosta - Sorgenti "Minerali" di Marano Equo -</i>	
<i>Anticoli Corrado.....</i>	<i>34</i>
<i>1.6.2. Bacino dell'alto Aniene - Sorgenti del Liri.....</i>	<i>34</i>
<i>1.6.3. Torrente Bagnatore - Piana del Cavaliere.....</i>	<i>35</i>

Bilancio idrologico del bacino dell'alto Aniene.....	36
2.1. Introduzione	36
2.2. Definizione dell'area di studio	36
2.3. Inquadramento geologico regionale.....	37
2.4. Inquadramento idrogeologico.....	39
2.5. Periodo 1926-1995 (Analisi di bilancio medio annuo).....	39
2.5.1. Precipitazioni	39
2.5.2. Evapotraspirazione reale.....	42
2.5.2.1. Metodo di Thornthwaite - Mather.....	42
2.5.2.2. Metodo di Turc.....	42
2.5.3. Precipitazione efficace (<i>Pe</i>)	43
2.5.4. Deflusso totale (<i>Dt</i>)	44
2.5.5. Considerazioni sui dati di bilancio	44
2.6. Analisi di bilancio dell'anno idrologico 1994-1995	46
2.6.1. Precipitazioni (<i>P</i>).....	46
2.6.2. Evapotraspirazione reale (<i>Er</i>)	47
2.6.3. Precipitazione efficace (<i>Pe</i>)	47
2.6.4. Deflusso totale (<i>Dt</i>)	47
2.6.5. Considerazioni sui dati di bilancio	48
Analisi quantitativa del regime dell'alto Aniene.....	50
3.1. Introduzione	50
3.2. Acquisizione dati.....	51
3.3. Analisi dei dati sperimentali.....	51
3.3.1. Fiume Aniene.....	52
3.3.2. Torrente Simbrivio.....	55
3.3.3. Fosso Campo - Fosso dell'Obaco.....	56
3.4. Considerazioni sulla dinamica acquifero-fiume e riflessioni sulla struttura del sistema carsico.....	56
3.5. Considerazioni conclusive	57
La sorgente carsica dell'Inferniglio.....	58
4.1. Introduzione	58
4.2. Inquadramento geologico-strutturale dell'area.....	58
4.3. Stazione di monitoraggio "Inferniglio".....	60
4.4. Analisi dei dati.....	61
4.4.1. Descrizione delle matrici che alimentano la Sorgente Inferniglio ..	62

4.4.1.1. Matrice del serbatoio epicarsico.....	62
4.4.1.2. Flusso veloce nella rete di macrocondotti ("quick-flow"):	62
4.4.1.3. Flusso diffuso nel reticolo di fessure ("diffuse-flow")..	63
4.4.1.4. Flusso di base ("base-flow").....	64
4.5. Presentazione e discussione dei dati di monitoraggio della sorgente Inferniglio.	64
4.5.1. <i>I FASE (Settembre 1996) - Fig. 4.6.</i>	64
4.5.1.1. EVENTO A.....	64
4.5.1.2. EVENTI B-C-D.....	67
4.5.2. <i>II FASE (Novembre 1996)</i>	69
4.5.2.1. EVENTO A.....	70
4.5.2.2. EVENTO B.....	71
4.5.2.3. EVENTO C.....	71
4.5.3. <i>II FASE (Dicembre 1996).</i>	73
4.5.3.1. EVENTO D.....	74
4.5.3.2. EVENTO E.....	74
4.5.4. <i>III FASE (Febbraio 1997)</i>	74
4.7. Considerazioni conclusive	76
Processi di precipitazione di CaCO₃ alla sorgente Tartare (Monti Simbruini): misure di campo e simulazioni di laboratorio.	78
5.1. Introduzione	78
5.2. Lavori precedenti	80
5.3. Descrizione del metodo	82
5.3.1. <i>Risultati e discussione dei dati</i>	84
5.3.2. <i>Simulazioni di laboratorio</i>	90
5.4. Considerazioni sui risultati	92
CONCLUSIONI.....	93
Bibliografia generale.....	96

Premessa

La ricerca condotta ha per obiettivo l'analisi della dinamica di circolazione sotterranea nella idrostruttura carsica simbruino-ernica. I dati acquisiti vengono presentati a differenti scale di osservazione, in funzione delle metodologie di indagine ritenute più idonee alle finalità del lavoro.

Così, alla scala regionale viene precisato il quadro della circolazione sotterranea nell'area nord-occidentale dell'idrostruttura simbruina, attraverso l'analisi idrogeochimica delle acque riferite ai differenti circuiti ipogei. Il bilancio idrologico dell'alto bacino del Fiume Aniene e lo studio del regime del corso d'acqua, precisano il comportamento idrodinamico del settore interno della dorsale appenninica.

Alla scala di dettaglio delle osservazioni, vengono prese in esame le modalità di circolazione nel sistema carsico di una delle sorgenti più rappresentative dell'idrostruttura simbruina, la Sorgente Inferniglio, ubicata nell'alto Aniene alla quota di 504 m. Tale studio si basa sull'analisi di serie cronologiche di dati registrati nel sito in cui è ubicata l'emergenza carsica.

Infine, ad una scala più particolareggiata, vengono analizzati i processi che regolano negli ambienti naturali la precipitazione della calcite dai sistemi aperti $\text{CO}_2\text{-CaCO}_3\text{-H}_2\text{O}$, con lo scopo di definire quantitativamente il processo di accrescimento dei depositi travertinosi nei sistemi carsici.

Idrogeologia dei Monti Simbruini

1.1. Introduzione

Indagini idrologiche ed idrochimiche condotte sulle acque di superficie e sotterranee di aree carsiche e alluvionali, hanno consentito di precisare ad una scala di maggior dettaglio le condizioni ai limiti dell'acquifero regionale simbruino-ernico.

Dal censimento geochimico di 53 punti d'acqua deriva una migliore definizione delle direttrici di flusso sotterraneo, nelle grandi linee già identificate in precedenti lavori di sintesi (Boni *et al.*, 1986, Boni *et al.*, 1988; Governa *et al.* 1989; Brondi *et al.*, 1995). Sebbene ad una scala regionale delle osservazioni esista una buona conoscenza dei principali acquiferi e delle interazioni tra il circuito carsico superficiale e quello idrotermale, profondo, alla scala di dettaglio risulta ancora incerto il significato di alcune manifestazioni minerali "fredde" gassose, dell'area appenninica interna. Ciò è in parte dovuto alla carenza di un approfondito livello conoscitivo dell'assetto tettonico delle strutture geologiche locali, che sono sede di circolazione idrotermale. A tale riguardo si è fatto riferimento ai più recenti studi strutturali dell'area, da cui si delinea un esaustivo quadro regionale ma che lasciano, tuttavia, un ampio margine di incertezza per alcuni settori di grande interesse idrogeologico anche se di limitata estensione (es. area di Marano Equo).

Nel presente lavoro vengono prese in esame le acque sia sorgentizie che sotterranee dell'idrostruttura carbonatica simbruina, dal settore più orientale, lungo il versante destro della Val Roveto (Sorgenti del Liri; sorgenti di Zompo Lo Schioppo), fino alle propaggini nord-occidentali segnate dalla linea Olevano-Antrodoco (Sorgenti di Agosta, Sorgenti di Marano Equo, Piana del Cavaliere; Fig. 1.1). Sulla base dei dati idrologici e del confronto geochimico ed isotopico ($\delta^{18}\text{O}$) tra i campioni analizzati, vengono riconosciuti tre circuiti principali (Governa *et al.*, 1989, Duchi *et al.*, 1992, Boni *et al.*, 1980):

- il circuito carsico superficiale, diviso in una circolazione più profonda e lenta con recapito delle acque verso le principali sorgenti ai limiti del sistema ("extra massif springs", Governa *et al.*, 1989), ed in una più veloce e breve che si sviluppa all'interno del bacino dell'alto Aniene, a monte di Subiaco ("intra massif springs", *op. cit.*);
- il circuito idrotermale profondo, a bassa termalità (sorgenti di Marano Equo), alimentato dalle acque carsiche della struttura simbruina;
- il circuito superficiale che si sviluppa nei litotipi marnoso-calacarenitici dei Monti Ruffi.

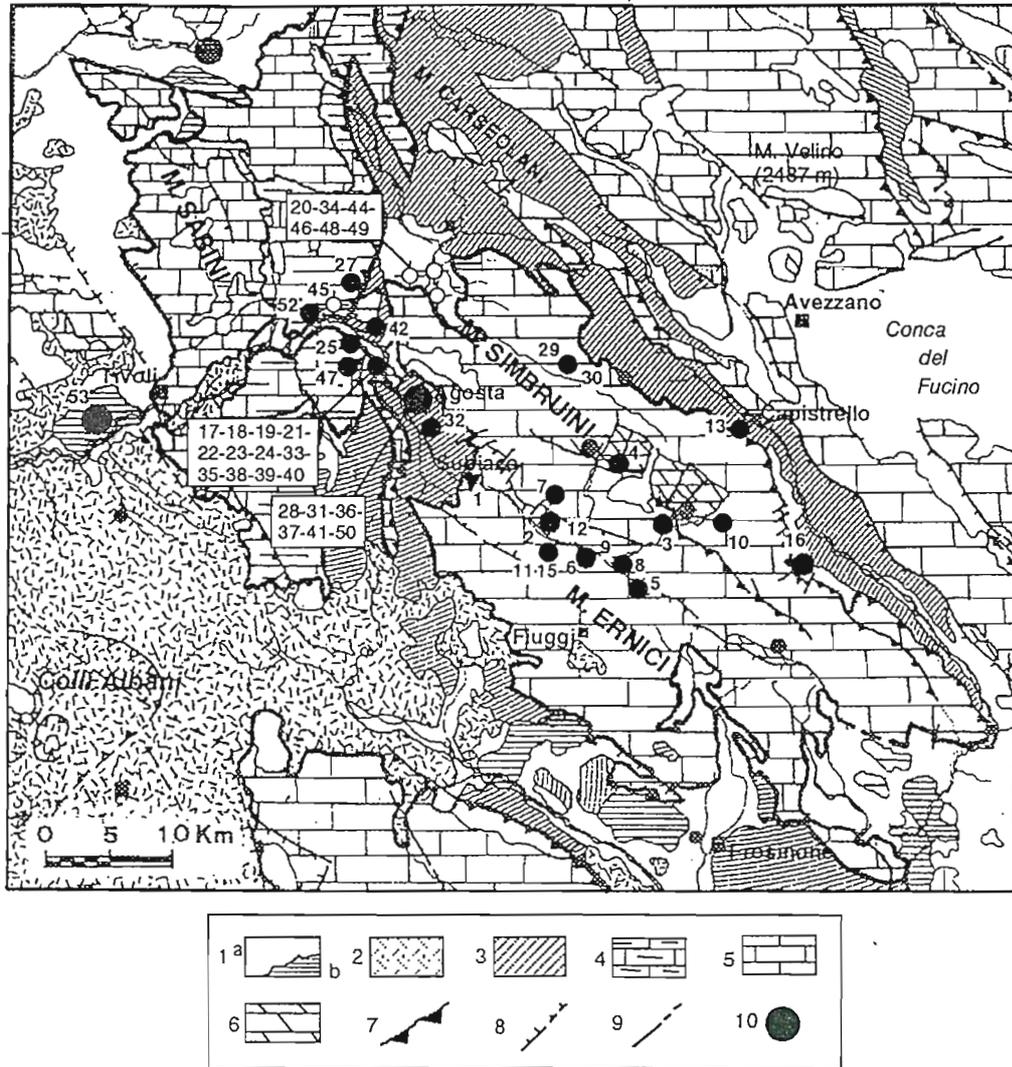


Fig. 1.1 - Schema idrogeologico dei Monti Simbruini ed Ernici (da Boni *et al.*, 1988, ridisegnato e modificato) LEGENDA: 1) Complesso dei depositi di copertura e colmamento (a: depositi continentali e marini, b: depositi travertinosi; Plioc. - Quat.); 2) Complesso delle vulcaniti (Plioc. - Pleistocene); 3) Complesso dei Flysch arenacei (Miocene - Plioc. p.p.); 4) Complesso di Transizione bacino-piattaforma (Giurassico p.p. - Olig.); 5) Complesso di Piattaforma carbonatica (Giurassico p.p. - Mioc. inf.); 6) Complesso dolomitico (Trias - Lias inf.); 7) Sovrascorrimento; 8) Faglia distensiva e verticale; 9) Faglia; 10) Sorgente localizzata

1.2. Definizione dell'area di indagine

I limiti geografici dell'area oggetto della ricerca coincidono approssimativamente con quelli della dorsale dei Monti Simbruini, dei Monti Ernici p.p. e dei Monti Ruffi. Nel settore occidentale dell'area di indagine sono comprese le manifestazioni sorgentizie ubicate tra gli abitati di Anticoli Corrado e Agosta, lungo la valle del medio Aniene (Fig. 1.2). Nel periodo 1995-1996 sono state condotte misure di portata e analisi sia chimiche che isotopiche ($\delta^{18}\text{O}$) sulle acque delle principali sorgenti dell'area simbruino-ernica. A queste sono state associate quelle riferite

all'unità dei Monti Ruffi, ubicate lungo la linea tettonica Olevano-Antrodoco nei pressi di Anticoli Corrado. Più a nord, sono state eseguite indagini idrologiche e idrochimiche nel settore della Piana del Cavaliere compreso tra gli abitati di Arsoli e Carsoli, che hanno interessato sia le acque del reticolo idrografico locale (Fosso Fioio, Fiume Turano), sia quelle sotterranee intercettate da pozzi privati. Con periodicità mensile (1996), sono stati condotti rilievi idrologici e chimico-fisici sulle acque del Torrente Bagnatore, il cui bacino imbrifero è ubicato al margine della struttura simbruina nel settore compreso tra la Piana del Cavaliere ed il Fiume Aniene. Il Bagnatore, tributario di destra dell'Aniene, ne alimenta la portata con contributo medio di circa $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (1996).

← 025

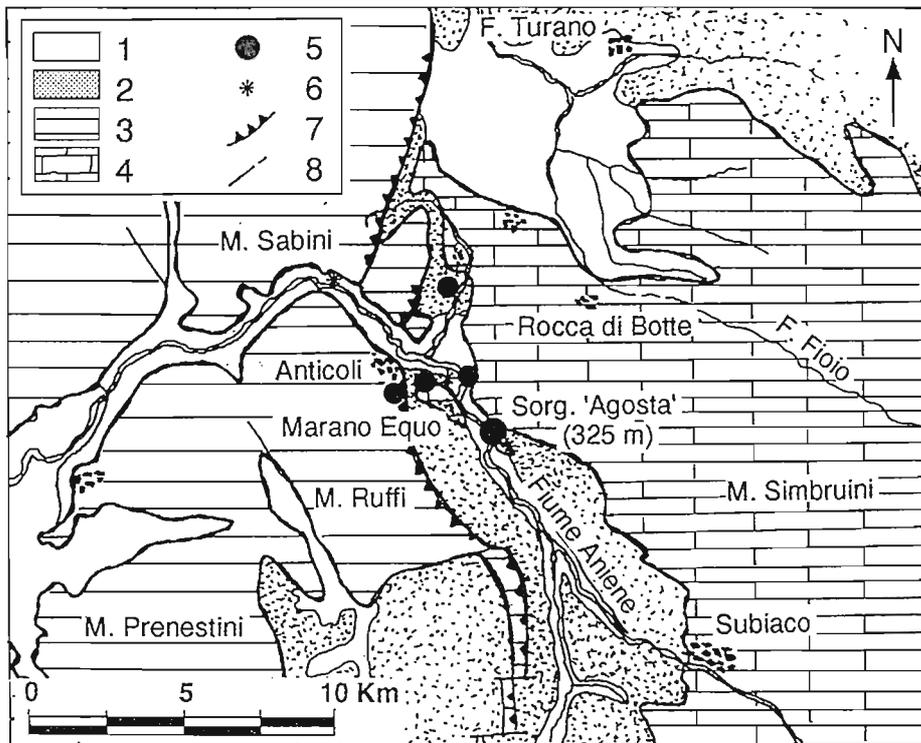


Fig. 1.2 - Media valle del Fiume Aniene. Ubicazione delle principali sorgenti analizzate

Rilevamenti analoghi condotti nel 1995, hanno interessato, inoltre, il bacino idrografico dell'alto Aniene (216 Km^2), con chiusura del dominio a Subiaco (365 m). I risultati di questa ricerca vengono esposti nel capitolo 2.

Infine, sono state caratterizzate dal punto di vista chimico sia le acque di alcune grandi sorgenti ubicate lungo il versante destro della valle del Fiume Liri sia quelle del Fosso Fioio, di portata limitata e ubicate a nord, oltre lo spartiacque del bacino del Fiume Aniene. Come confronto con le acque ricche minerali di Marano Equo sono state campionate quelle delle Sorgenti Albule, ← ? presso Bagni di Tivoli.

L'area oggetto delle indagini si articola quindi in più settori, riferendosi nel complesso all'idrostruttura carsica simbruina, di cui si intende precisare le condizioni ai limiti ad una scala

di maggior dettaglio. Alcuni aspetti particolari, su cui si è concentrata l'attenzione nel corso della ricerca, come ad esempio la dinamica di circolazione carsica nella zona areata e il processo di precipitazione del carbonato di calcio, vengono discussi in sezioni dedicate (Cap. 4 e 5).

1.3. Inquadramento geologico regionale

Lo studio delle condizioni ai limiti dell'idrostruttura simbruino-ernica è stato concentrato in particolare nel settore nord-occidentale della dorsale, al limite della linea "Olevano-Antrodoco", dove affiorano i terreni appartenenti alle unità paleogeografico-strutturali della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese (Monti Simbruini ed Ernici) e di transizione ai bacini adiacenti, in *facies* sabina (Monti Prenestini e Ruffi).

I depositi torbiditici alto-miocenici, largamente affioranti nella valle dell'Aniene tra Subiaco e Marano Equo, costituiscono per la loro posizione stratigrafica e per l'assetto strutturale il limite idrogeologico tra le unità di piattaforma e quelle di transizione.

La valle del fiume Aniene rappresenta l'elemento morfologico di raccordo tra diverse unità litostatigrafiche e strutturali, poiché attraversa dalle sorgenti montane fino a Subiaco la dorsale carbonatica simbruino-ernica, quindi i depositi torbiditici tortoniani (*Unità di Frosinone* Auct.) in affioramento fino all'abitato di Marano Equo e, più a valle i rilievi calcareo-marnosi dei Monti Sabini (a Nord) e dei Ruffi (a Sud). Come è noto, questi ultimi, con asse meridiano, risultano delimitati verso Est dalla linea Olevano-Antrodoco.

1.3.1. Domini di sedimentazione

Durante il ciclo sedimentario mesozoico, nel settore oceanico in espansione cominciano a delinearsi tre differenti domini di sedimentazione, caratterizzati da caratteri litostatigrafici e strutturali nel complesso omogenei. Dopo le prime fasi di ingressione marina sul basamento paleozoico in apertura, con deposizione di *facies* dapprima evaporitiche e dolomitiche coperte successivamente da un potente spessore di sedimenti di piattaforma (Calcarea massiccio), segue nel Lias medio lo sprofondamento del settore nord-occidentale del dominio di piattaforma, con la formazione di un articolato ambiente deposizionale di mare aperto.

Mentre per tutto il mesozoico persisteranno nell'area laziale-abruzzese le condizioni di subsidenza e di mare basso favorevoli alla deposizione continua delle sequenze carbonatiche di piattaforma neritica, nel settore umbro-marchigiano si sviluppa un esteso dominio pelagico. Tra i due ambienti si individua una fascia di transizione costituita da serie stratigrafiche con caratteri deposizionali intermedi tra quelli di piattaforma e tipicamente pelagici. Nell'area in studio, a tale dominio si riferiscono i depositi marnoso-calcarenitici dei Monti Ruffi p.p. e dei Monti Sabini sud-orientali.

1.3.1.1. Dominio di Piattaforma carbonatica

La dorsale carbonatica simbruino-ernica è costituita da una successione potente oltre 4000 m di rocce calcareo-dolomitiche depostesi, in ambiente di piattaforma subsidente, in continuità di sedimentazione dal Trias superiore fino al Cretacico superiore (Parotto & Praturlon, 1975; Devoto, 1970; Damiani, 1990a-b; Accordi *et al.*, 1986) lungo il margine passivo africano a partire dalle prime fasi di apertura del bacino oceanico della Tetide. La successione mesozoica vede evolvere i termini triassici prevalentemente dolomitici (Trias sup. - Giurassico inf.), di laguna e di mare sottile, verso *facies* progressivamente più calcaree (Giurassico p.p. - Cretacico sup.), evidenza di una persistente stabilità delle condizioni di sedimentazione interrotta solamente alla fine del Cretacico. Terminata la fase di apertura della Tetide, le prime conseguenze del regime di chiusura dell'oceano sono dapprima l'approfondimento e poi l'emersione di tutto il dominio di piattaforma, già smembrata in più unità tra loro disarticolate. La lacuna 'paleogenica' costituisce l'evidenza della lunga emersione, interrotta nel Miocene medio dalla trasgressione langhiano-serravalliana, con la deposizione dei *Calcarei a Briozoi e Litotamni* (Auct.), in paraconcordanza sui termini mesozoici. All'interno della dorsale simbruina essi affiorano in piccoli lembi circoscritti, ad esempio nell'area di Trevi nel Lazio e di Jenne, mentre affiorano estesamente nel settore sud-occidentale, nei rilievi Affilani ed Ernici.

La deposizione dei calcari organogeni miocenici segna la fine della sedimentazione carbonatica, sia nella successione laziale-abruzzese che ai margini di essa, in ambiente di rampa carbonatica (Monti Ruffi, Monti Prenestini), lasciando il posto ai potenti depositi torbiditici altomiocenici contemporanei alla messa in posto delle unità tettoniche appenniniche.

Le *facies* torbiditiche argilloso-arenacee del Miocene superiore sono presenti ai margini della struttura simbruino-ernica, con spessori che raggiungono il migliaio di metri e che colmano le adiacenti depressioni morfo-strutturali della valle del Sacco, del medio Aniene e dell'alto Liri.

L'assetto tettonico della struttura simbruina è riconosciuto nello stile compressivo con vergenza NE, che porta al sovrascorrimento della dorsale carbonatica sulle torbiditi altomioceniche della Val Roveto, e ai più complessi sovrascorrimenti interni nei M. Simbruini, nei M. Affilani e nei pre-Ernici (Devoto, 1970; Damiani, 1990a-b; Parotto *et al.*, 1990). In tutta la dorsale e particolarmente ai margini sud-occidentali sono riconoscibili i segni della tettonica distensiva pliocenico-quadernaria (faglie estensive e verticali), che smembra le unità sovrascorse in una successione di blocchi contigui indicativamente ad *horst* e *graben*.

Nell'ambito di una certa unitarietà regionale della dorsale, vengono riconosciute al suo interno più unità di volume (Damiani, 1990a; 1992) i cui rapporti geometrico-strutturali pongono seri problemi di interpretazione cinematica delle differenti fasi orogenetiche appenniniche. L'assetto tettonico che la struttura eredita e le condizioni climatiche, condiziona lo sviluppo del

processo carsico che, ampiamente rappresentato nella dorsale, caratterizza l'idrogeologia della regione appenninica.

1.3.1.1.1 Principali unità litostratigrafiche

La successione stratigrafica dei Monti Simbruini (Devoto, 1970; Bergomi, 1974; Damiani 1990a-b; 1992) viene descritta con particolare riferimento alle caratteristiche idrogeologiche delle litoformazioni in affioramento (Ercolani, 1989):

- UNITA' DOLOMITICA INFERIORE (Triassico superiore-Liassico inferiore)

Tale unità, corrispondente alle *Dolomie di Filetino e Vallepietra* Auct., rappresenta nell'area in esame la base della serie stratigrafica. Non se ne conosce il letto, mentre il limite superiore è costituito dalla prima comparsa di sequenze calcaree riferibili al Liassico medio.

I litotipi caratteristici sono costituiti da rocce a tessitura microcristallina e saccaroide, formati per precipitazione primaria in ambienti lagunari iperialini (Devoto, 1970). Frequenti risultano le inclusioni bituminose ed episodiche le intercalazioni marnose. Il contenuto paleontologico è rappresentato dalla flora algale a Dasycladacee (*Gyroporella vesiculifera* GUMB. e *Diplopora* sp.) e da malacofaune caratteristiche del Norico-Retico.

Lo spessore dell'unità dolomitica supera 1000 metri.

- UNITA' CALCAREA INFERIORE (Liassico medio - Malm)

Un passaggio graduale segna la comparsa, in continuità stratigrafica, di una *facies* sempre più calcarea, caratterizzata da calcari micritici ed intramicritici con intercalazioni locali di dolomie grigie cristalline. Tale unità è costituita da termini litologicamente più eterogenei della precedente, che evolvono verso un graduale uniformarsi della litologia del bacino di sedimentazione, pur sussistendo evidenti eteropie laterali.

Lo spessore è di circa 1100 metri.

- UNITA' DOLOMITICA SUPERIORE (Neocomiano-Cenomaniano)

In continuità stratigrafica sulla sottostante unità poggiano dolomie cristalline, massive, in cui sono localmente presenti lenti calcarenitiche (Bergomi, 1973).

I macrofossili sono rappresentati da piccole Nerinee e da specie di *Requienia* e *Toucasia* difficilmente identificabili. Anche questa unità vede la divisione in più biozone distinte in base a specifiche associazioni microfaunistiche.

Lo spessore è di circa 1000 metri.

- UNITA' CALCAREA SUPERIORE (Cretacico superiore-Miocene inferiore)

La litofacies è costituita da calcari stratificati micritici con sottili intercalazioni di argille verdi e giallastre, di calcari fogliettati e di brecce (Devoto, 1970). Al limite superiore sono presenti

depositi in *facies* di breccia. Il contenuto paleontologico dei termini cretacici è rappresentato dai macrofossili *Caprina adversa* (D'ORB.), *Sauvagesia nicasei* (COQ.), *Radiolites praesauvagesi* TOUCAS. e da altre associazioni a Rudiste, nonché dalle microfaune ad *Alveolinidae*.

Il Miocene è caratterizzato dai *Calcari a Briozi e Litotamni*, presenti nell'area di Trevi nel Lazio e in un limitato affioramento a Jenne, trasgressivi sui termini alto-cretacici. Lo spessore complessivo è di 1200 metri circa.

- UNITA' PELITICO-ARENACEA (Miocene medio-sup.)

Presente nell'area del bacino "Alto Aniene" con affioramenti assai modesti, questa unità è costituita da sequenze torbiditiche argilloso-arenacee, con episodiche intercalazioni calcarenitiche e conglomeratiche.

Lo spessore, che nell'ambito della serie stratigrafica laziale-abruzzese è pari ad oltre un migliaio di metri, limitatamente all'area in studio risulta di qualche decina di metri, nei piccoli lembi in cui affiora.

- UNITA' RUDITICA (Pliocene)

E' costituita prevalentemente da calciruditi massive ad elementi eterometrici provenienti dalla piattaforma carbonatica, da puddinghe poligeniche con elementi estranei alla serie locale (graniti, selce, porfidi etc.) e da breccie carbonatiche cementate. Lo spessore complessivo è di poche decine di metri.

- DEPOSITI QUATERNARI

I depositi quaternari, rappresentati da limitati affioramenti di diversi termini sedimentari in *facies* continentale, completano il quadro stratigrafico dell'area in esame. Prevalgono, in quanto ad estensione, le breccie calcaree che a volte colmano le valli (come accade a sud-ovest dell'abitato di Filetino, lungo la valle dell'Aniene) oppure affiorano come depositi di pendio anche di rilevante spessore. Diffusi risultano anche i conglomerati, in giaciture basculate dalla neotettonica e disposti a varie quote sui versanti.

Nel bacino sono ben rappresentati i depositi di travertino; il più esteso è quello di Subiaco sebbene anche altrove si rinvengano lembi e ammassi in prossimità di sorgenti e cascate, che modellano il fondo delle valli molto incise.

1.3.1.2. Dominio di transizione sabino

Ad Ovest della linea Olevano-Antrodoco affiorano i termini calcareo-marnosi prevalentemente miocenici dei M. Ruffi e dei M. Sabini sud-orientali. La linea tettonica citata, che rappresenta il fronte della falda Sabina (Cipollari & Cosentino, 1992), costituisce l'evidenza dell'accavallamento pliocenico del dominio di scarpata sabino sui depositi flyschoidi tortoniani

della valle dell'Aniene e, a nord dell'abitato di Roviano, sulla dorsale mesozoica simbruina (Corrado, 1995).

Nell'area in esame la successione stratigrafica, in *facies* di rampa carbonatica, è costituita dalle unità del Miocene medio-superiore della serie umbro-sabina e dalle unità silicoclastiche tortoniane della *Formazione di Frosinone*. Il termine litostratigrafico più antico presente in affioramento nell'area di indagine è rappresentato dalla *Formazione di Guadagnolo* (Parotto & Praturlon, 1975), costituita da una fitta alternanza di marne calcaree, marne e marne siltoso-argillose depostesi nell'Aquitano-Langhiano p.p. (Corrado, 1995), poggianti sulle Marne e breccie a macroforaminiferi (Priaboniano-Aquitano), non presenti in affioramento. Verso l'alto, l'unità basso-miocenica evolve gradatamente nell'unità dei *Calcari bioclastici* del Langhiano p.p.-Tortoniano p.p., largamente affiorante nei Monti Ruffi e corrispondente alla unità dei *Calcari a Briozoi e Litotamni* dell'adiacente dominio di piattaforma carbonatica, trasgressiva sui calcari del Cretacico superiore. Le formazioni descritte (*Formazione di Guadagnolo* e *Calcari bioclastici*) appartengono ad un ambiente paleogeografico di rampa carbonatica, adiacente alla piattaforma laziale-abruzzese, rapidamente coinvolto nel Tortoniano medio dalle più critiche fasi dell'orogenesi appenninica. Nel nuovo bacino tortoniano, generatosi per flessurazione litosferica (Cipollari & Cosentino, 1992), si depongono così dapprima l'unità delle Marne a *Orbulina*, costituite da alcune decine di metri di calcari marnosi e marne che evolvono verso l'alto in marne argillose ricche in foraminiferi planctonici, quindi le potenti sequenze terrigene in *facies* torbiditica (*Formazione di Frosinone*), riferibili al Tortoniano superiore (Cipollari & Cosentino, 1992). Nell'area della media valle del Fiume Aniene gli spessori delle associazioni torbiditiche raggiungono i 2000 metri (Damiani, 1982). Depositi continentali quaternari, rappresentati in particolare dai sedimenti alluvionali del Fiume Aniene, e da limitati affioramenti di travertini completano il quadro litostratigrafico dell'area in esame.

1.4. Sintesi degli studi geochimici precedenti

La grande disponibilità e varietà composizionale della risorsa idrica del Lazio ha spinto diversi Autori allo studio idrogeochimico del territorio, nel tentativo di inquadrare le diverse tipologie riconosciute nell'ambito di un modello idrogeologico regionale. Di seguito vengono presentati alcuni dei lavori a carattere regionale che negli ultimi trenta anni hanno preso in considerazione problematiche geochimiche ed isotopiche delle acque naturali della regione laziale. _

Dall'Aglio & Tonani (1962) classificano le acque superficiali del Lazio in tre gruppi idrogeochimici caratteristici: (i) le acque bicarbonato-alcantino-potassiche; (ii) le acque a componente solfato-calcica; (iii) le acque bicarbonato-calciche. Mentre per le prime e le ultime veniva rilevata la buona correlazione tra il loro chimismo e le caratteristiche litologiche dominanti dei siti di campionamento (complesso delle vulcaniti plio-quadernarie e dorsali carbonatiche mesozoiche), è interessante rilevare come per le seconde gli Autori abbiano correlato la natura solfato-calcica delle acque al carattere evaporitico dei sedimenti con cui possono avere interagito. Viene riconosciuta, inoltre, una origine profonda delle matrici liquide ricche in gas, soprattutto CO₂.

Lo studio isotopico condotto da Zuppi *et al.* (1974) su sei sorgenti sulfuree dell'Italia centrale (Lavinio, Tivoli Acque Albule, Cotilia, Monte Sant'Angelo, Antrodoco, Acqua Santa) e sulle acque meteoriche dei versanti appenninici adriatico e tirrenico, porta alla definizione del concetto di "aree isotopiche di ricarica" degli acquiferi sottesi dalle sorgenti in studio. Tali aree di alimentazione vengono riconosciute dagli Autori sulla base della relazione lineare che lega le variazioni di $\delta^{18}\text{O}$ (‰) delle acque di precipitazione con la quota di infiltrazione delle stesse.

Vengono così definiti due gradienti $\delta^{18}\text{O}$ / altitudine, validi rispettivamente per i versanti adriatico ($-2,82 \cdot 10^{-3}$ ‰ / m) e tirrenico ($-3,44 \cdot 10^{-3}$ ‰ / m) e le corrispondenti variazioni stagionali, con l'indicazione delle differenti informazioni desumibili dai diversi periodi dell'anno a cui si riferiscono i dati isotopici. Una volta definito il valore isotopico medio dell'anno, restano valide le considerazioni idrogeologiche che può fornire il confronto tra i valori assoluti di $\delta^{18}\text{O}$ riferiti ad acque differenti a partire, in ogni caso, da una precisa conoscenza delle condizioni geologiche ed idrogeologiche al contorno dei sistemi in discussione.

Sulla base dello studio degli isotopi dello Zolfo presente nei solfati e nei solfuri, vengono riconosciute dagli Autori due possibili origini dell'elemento nelle sei sorgenti analizzate: una origine endogena, con $\delta^{34}\text{S}$ pari a circa 0‰ per Lavinio, e una origine sedimentaria con $\delta^{34}\text{S}$ compreso tra +15 e +22‰ a seconda dell'età e della natura del deposito da cui si origina, per interazione con orizzonti evaporitici permo-triassici (sorgenti di Antrodoco e Cotilia). Per le Sorgenti Albule, presso Tivoli, Monte Sant'Angelo e Acqua Santa viene ipotizzata una miscelazione fra solfati e solfuri ascrivibili alle due diverse sorgenti dell'elemento. Relativamente alle Sorgenti Albule, infine, gli Autori propongono un modello di circolazione

confrontabile a quello di una falda confinata, con debole contributo alla sorgente di acque di infiltrazione recente e tempo di residenza nella roccia serbatoio, ricavato dagli isotopi del Carbonio, di circa 20 anni

Nell'ambito di ricerche idrologiche, idrogeologiche e idrogeochimiche condotte dall'Università di Roma "La Sapienza" negli anni '70-'80, Boni *et al.* (1980) dall'analisi del sistema carsico lepino-ausono e della Pianura Pontina, elaborano un modello regionale di circolazione sotterranea rappresentato da due circuiti tra loro interagenti: (i) il circuito carsico superficiale, che si sviluppa nelle grandi dorsali carbonatiche in affioramento (M.ti Lepini ed Ausoni); (ii) il circuito idrotermale profondo (Pozzo Fogliano), che ha sede nei depositi in *facies* di transizione sabina, sepolti al di sotto della copertura plio-quadernaria della Pianura Pontina. Oltre ai due *end-members* idrochimici (acque bicarbonato-calciche a bassa mineralizzazione - acque acide idrotermali, con forte carica gassosa costituita prevalentemente da CO₂ e H₂S ed elevati tenori in solfati), gli Autori individuano nel corteo di sorgenti pedemontane poste ai margini interni della pianura, i termini di miscelazione delle due matrici 'pure'. In realtà, viene precisato che le acque erogate dallo stesso Pozzo Fogliano non sono da considerarsi come *end-member* del circuito idrotermale. Circa l'origine di tale circuito viene proposta l'esistenza, al di sotto del *graben* pontino, di un processo di metamorfismo termico subito dal Trias evaporitico, in grado di generare le anomalie termiche registrate al Pozzo Fogliano (48-65°C), le forti emanazioni gassose (CO₂, H₂S, HF) e, più in generale, l'arricchimento in solfati delle acque.

Dall'analisi del chimismo delle acque erogate dal Pozzo Fogliano (la cui analisi isotopica ne ha rivelato l'origine meteorica) si deduce che la loro mineralizzazione può essere messa in relazione a lisciviazione di rocce evaporitiche, pur non potendosi escludere la lisciviazione di rocce vulcaniche, per la presenza di apprezzabili tenori di F⁻ e K⁺. Inoltre, il rapporto Na⁺-K⁺-Mg²⁺ metterebbe in evidenza interazioni dei fluidi idrotermali con sedimenti argillosi, peraltro abbondantemente rappresentati nella Pianura Pontina.

Bono (1981) propone l'applicazione del metodo dei volumi, di impiego nel campo geominerario, al calcolo del potenziale geotermico della regione Lazio. L'indicazione quantitativa fornita dall'Autore risulterebbe largamente sottostimata se si ammette il rinnovamento ciclico delle riserve geotermali dei serbatoi sepolti, idraulicamente collegati con le principali idrostrutture carbonatiche o vulcaniche appenniniche in affioramento. Da tale studio si deduce che la quantità totale di riserva geotermale del Lazio è costituita per il 47% dalla Riserva utilizzabile per la produzione di energia elettrica (con temperatura dei fluidi superiore a circa 130°C) e per il restante 53% dalla Riserva per usi non elettrici, con temperatura inferiore a 130°C.

Attraverso l'analisi sia chimico-fisica che isotopica di 64 campioni di acque superficiali e sotterranee, Governa *et al.* (1989) identificano due principali circuiti idrogeologici caratteristici dell'area centro-appenninica: (i) il circuito carsico, superficiale, che si sviluppa nelle strutture

carbonatiche mesozoiche ed (ii) il circuito idrotermale, profondo, caratterizzato da acque con chimismo e termalità del tutto peculiari.

All'interno del primo circuito vengono identificati (i-1) una circolazione tipo *intra-massif*, con sistemi sotterranei brevi ed epidermici (es.: le sorgenti dell'alto Aniene, nei Monti Simbruini) in cui è riconoscibile il segnale sia chimico che isotopico stagionale delle acque; e (i-2) una circolazione di tipo *extra-massif*, caratterizzata da lunghi tempi di residenza delle acque nella roccia serbatoio e recapito nelle principali sorgenti ai limiti dei rilievi carbonatici (es.: Sorgenti di Agosta, Monti Simbruini) in cui non è possibile, di norma, riconoscere significative variazioni stagionali del chimismo e della connotazione isotopica delle acque.

Nell'ambito della circolazione *intra-massif* (i-1, acquiferi carsici superficiali) si distinguono, inoltre: (i-1A) un circuito relativamente più profondo, corrispondente al flusso di base, generalmente soprassaturo rispetto alla calcite e più uniforme chimicamente ed isotopicamente durante il ciclo idrologico annuo, e (i-1B) un circuito più epidermico, corrispondente a quello epicarsico, caratterizzato da minori tempi di interazione acqua-roccia. In esso è marcata la variabilità stagionale chimica ed isotopica delle acque, generalmente (ma non esclusivamente) sottosature rispetto alla calcite.

Nella circolazione di tipo *extra-massif* (i-2, acquiferi carsici basali) gli *input* meteorici non sono distinguibili in termini di variabilità stagionale del chimismo e della caratterizzazione isotopica delle acque, mentre viene rilevata la sostanziale confrontabilità qualitativa con la matrice idrochimica riferita al 'flusso di base' (i-1A) dei circuiti *intra-massif*.

Il circuito termale profondo (ii) interagisce con quello carsico, sia epidermico che basale, dando luogo a tutte le tipologie idrochimiche intermedie comprese tra i due estremi.

Vengono identificati, inoltre, due tipi di circuiti profondi: (ii-1) circuiti interagenti con il basamento evaporitico triassico; (ii-2) circuiti interagenti con sistemi geotermici perivulcanici. Ai fenomeni di interazione del primo tipo (ii-1, circuiti prevalentemente gassosi ricchi in CO₂ di provenienza metamorfica interagenti con il substrato evaporitico) sono riferibili, secondo gli Autori, le manifestazioni minerali fredde di Cotilia e di Marano Equo (Monti Ruffi), ricche in solfuri, ossidati in solfati.

L'abbondanza in solfati nelle acque riferite ai sistemi perivulcanici è dovuta, invece, al contributo endogeno di origine prevalentemente vulcanica.

Dall'analisi chimico-fisica ed isotopica regionale, gli Autori delineano un complesso quadro idrogeologico che deriverebbe dalla diversa interazione dei tre *end-members* citati: il circuito omogeneo tipico dei sistemi carsici *extra-massif*; il circuito carsico, superficiale (epicarso e flusso di base); il circuito profondo, ricco in apporti gassosi e solfati di origine sedimentaria o perivulcanica.

Duchi *et al.* (1991) dallo studio geochemico delle acque del Lazio meridionale, individuano due tipi di circolazione: il primo identificabile nelle strutture carbonatiche mesozoiche e con recapito

delle acque per lo più ai margini dei sistemi carsici, il secondo rappresentato dalle acque di infiltrazione nell'edificio vulcanico dei Colli Albani, entrambi alimentati da acque di origine meteorica.

Dal primo circuito si originano acque con chimismo sia bicarbonato calcico che bicarbonato-solfato, mentre il chimismo delle acque del circuito vulcanico (bicarbonato-alcalino-terroso o bicarbonato alcalino) è fortemente legato alla fase gassosa, costituita principalmente da anidride carbonica di origine profonda. In analogia con i sistemi termali tosco-laziali peritirrenici, gli Autori individuano nell'area albana la presenza di CO₂ legata a fenomeni di metamorfismo termico (200-300°C) dei depositi carbonatici sepolti. Dallo studio dei geotermometri il Lazio meridionale viene considerato come una regione caratterizzata al più da fluidi a bassa entalpia (<80°C).

In un recente lavoro di sintesi, Brondi *et al.* (1995) prendono in esame acque di differente natura chimico-fisica relative alle principali idrostrutture del Lazio meridionale (Colli Albani, Roccamonfina, Monti Lepini, Monti Simbruini-Ernici-M.Cairo, Monti Ausoni). Gli Autori identificano nelle venute gassose idrotermali, ed in particolare nella CO₂, il fattore che più di ogni altro influenza il chimismo delle acque naturali, classificabili in acque bicarbonato-calciche di circolazione nelle sequenze carbonatiche prevalentemente mesozoiche e in quelle di circolazione nelle vulcaniti plio-pleistoceniche, dominate da chimismo bicarbonato-alcalino-terroso. Entrambe le matrici, interagendo con fluidi idrotermali prevalentemente gassosi, originano mixing con particolari caratteri geochemici, elevata mineralizzazione e pressione parziale di CO₂. Circa l'origine di tale gas vengono ipotizzate sia la possibile risalita da zone profonde (mantello) attraverso le principali faglie attive di interesse regionale, sia le reazioni di termometamorfismo nei confronti di rocce carbonatiche, nelle zone crostali più superficiali. In questo caso, la CO₂ metamorfica risulterebbe pressoché priva di He e Rn poiché tali specie mancano o sono assai rare nei carbonati.

Nei pressi degli apparati vulcanici maggiori, inoltre, l'anidride carbonica può derivare dal degassamento di masse magmatiche relativamente superficiali. L'analisi effettuata dagli Autori sulle Acque Albule (Tivoli) fa ipotizzare la lisciviazione dei sedimenti evaporitici triassici da parte di fluidi caldi di origine idrotermale, ricchi in CO₂, con conseguente arricchimento delle acque in solfati e solfuri.

1.5. Presentazione dei dati

I dati delle analisi chimiche ed isotopiche ($\delta^{18}O$) riferiti alle acque della idrostruttura simbruina (Tab. 1.1) vengono discussi separatamente per le diverse unità fisiografiche riconosciute. Dati ed elaborati grafici sono così raccolti in tre sezioni relative a:

Unità fisiografica del medio Aniene - Torrente Bagnatore;

Unità fisiografica dell'alto Aniene - alto Liri;

Unità fisiografica della Piana del Cavaliere.

n. campione (Gen-Nov 1996)	quota (m ³ /s)	Portata (m ³ /s)	T (°C)	pH	Cond. el. ($\mu S/cm$)	Torb. (NTU)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Fe (mg/l)	TDS (mg/l)
1 F. Aniene a Subiaco	365	8,25	9,9	8,54	296	1,24	238	10,25	7,09	0,60	54,26	8,09	2,85	0,46	0	322
2 Sorg. Inferniglio	504	0,3	9,2	7,96	275	0,33	224	1,25	10,64	0,55	65,16	5,49	2,77	0,47	0	310
3 Sorg. Pertuso	699	2,55	7	8	251	0	199	5,80	7,09	0,14	62,16	8,52	2,04	0,41	0	285
4 Sorg. Acqua Nera	990	0,003	7,5	7,64	344	0,29	303	1,25	7,09	0,14	50,72	21,86	1,92	0,03	0	386
5 Sorg. Capo d'Acqua	772	0,06	9,7	7,35	302	0,26	232	3,32	7,09	0,05	76,15	1,72	3,07	0,28	0	324
6 Sorg. Ceraso	625	0,48	8,5	7,36	258	0,53	199	1,25	7,09	0,21	66,78	3,34	2,36	0,31	0,02	280
7 Sorg. Jenne	825	<0,001	9,8	7,86	346	0,31	276	1,25	10,64	0,00	85,13	5,04	3,48	0,08	0	382
8 Sorg. La Foce	650	0,94	7,8	7,38	238	0,28	196	3,32	3,55	0,17	52,12	3,34	1,98	0,26	0	261
9 Sorg. La Mola	630	0,57	9,9	7,85	268	1,08	220	5,80	3,55	0,32	52,12	6,01	2,77	0,51	0	291
10 Sorg. Moscose	1600	0,003	3,7	7,27	207	0,25	173	3,32	7,09	0,88	50,42	0,65	1,48	0,55	0	237
11 Sorg. Cardelline	558	0,025	12,4	7,6	341	0,42	271	5,80	7,09	0,14	80,47	2,82	4,28	0,21	0	372
12 Sorg. Comunacque	560	-	10,2	7,58	317	0,23	255	3,32	12,41	0,17	101,08	7,3	3	0,42	0,03	383
13 Sorg. del F. Liri	-	-	6,4	7,83	283	0,44	222	3,32	7,09	0,24	52,75	10	1,98	0,55	0,01	298
14 Stillicidio inferniglio	520	-	9,1	8,15	275	0,2	237	1,25	7,09	0,45	76,15	13,18	3,82	0,11	0	339
15 Sorg. Le Tartare	565	0,06	9	7,53	331	0,41	260	11,22	10,64	0,94	76,15	3,09	3,91	0,67	0	367
16 Sorg. Zompo Schloppo	-	-	8,3	7,97	237	0,36	193	0,00	3,55	0,17	50,07	6,01	1,43	0,24	0	254
17 S. Minerale Marano E.	325	-	14,1	6,42	1372	0,16	1031,2	17,73	8,86	0,05	210,5	36,5	3,41	1,62	0	1310
18 Sorg. Auriella	324	<0,01	15,5	6,3	2110	57	1708,6	265,00	8,86	0,19	386,5	82,3	56,3	7,56	0,05	2515
19 Sorg. Castagnole 1	330	<0,001	13	6,54	1072	0,26	823,77	4,59	3,55	0,11	186,75	30	4,58	1,42	<0,01	1055
20 P. Comune Oricola	620	-	12,9	7,22	528	0,4	329,51	5,60	7,09	1,52	75,2	16	4,31	0,37	<0,01	440
21 Sorg. Archileo	330	<0,001	13,2	6,5	1080	0,24	805,5	21,28	5,32	0,44	191,6	32,5	4,71	1,41	<0,01	1063
22 Sorg. Noce	325	<0,01	13,2	6,26	1935	0,22	1623,1	21,28	8,86	0,31	189,3	31,4	4,71	3,26	0,05	1882
23 Sorg. Noce Solf.	325	<0,01	17,2	6,11	2380	0,94	1891,6	186,50	5,32	0,78	386	68,5	38,9	8,65	0,2	2586
24 Sorg. Noce Fe	325	<0,01	12,4	6,53	985	0,33	732,2	10,64	5,32	0,25	368	26,6	3,47	1,15	0,08	1148
25 Sorg. Sossanti	500	0,002	12	7,75	408	0,37	274,6	3,55	8,86	0,16	95	8,5	3,71	0,87	0,08	395
26 F. so Bagnatore 7	327	0,35	9,8	7,96	596	-	378,32	2,14	10,64	13,71	156	18,7	6,06	1,44	0	587
27 Fonte Limosa	700	<0,001	10,6	7,28	510	0,21	334,4	19,51	16	0,03	115,6	8,9	7,74	0,64	0	503
28 Sorg. Muricella	330	<0,001	11,8	7,14	560	0,35	402,73	0,99	7,09	1,81	114,59	21,5	3,17	0,5	0	552
29 Sorg. Fiolo Vecchia	975	0,03	9,8	7,6	358	0,2	268,49	1,24	3,55	0,15	64,71	17,5	1,94	2,27	0	360
30 Sorg. Fiolo Nuova	975	0,01	6,7	7,7	360	0,2	270,5	1,25	3,6	0,15	61,71	18,7	1,94	2,3	0	360
31 Sorg. Mola Nuova	328	<0,001	12,2	6,74	846	0,3	610,2	3,25	3,55	1,24	162,21	25	4,03	0,35	0	810
32 Sorg. Ammalati	350	<0,001	12,3	7,14	575	1,44	396,63	5,60	14,19	0,77	120,64	16,9	4,8	1,54	0	561
33 Sorg. Minerale Fe	325	<0,001	13,6	6,4	1329	0,22	1018	23,05	5,32	0,28	201,3	28,7	3,53	1,55	0,08	1282
34 P. Campo Sp. Oricola	620	-	12,8	7,33	560	-	349	8,87	12,4	12,30	123,1	26,8	4,3	0,4	0	537
35 Sorg. Arco	328	0,08	11,5	7,15	600	0,36	427,1	12,41	8,86	0,37	121,6	20,7	3,84	0,71	0	596
36 S. Mola di Agosta	330	-	10,1	7,08	505	0,31	378,3	1,77	5,32	0,50	115,3	22,3	2,3	0,64	0	526
37 Ponte Anticoli 1	328	-	11	6,94	641	1,5	512,6	8,87	7,09	0,56	100,2	21,5	3,2	0,65	0	655
38 Sorg. Vagno	330	<0,001	12,3	6,98	685	0,36	475,96	1,52	10,64	0,24	136,64	25,9	3,11	0,72	0,01	655
39 S.S. Maria	338	<0,001	12,9	6,63	960	1,1	732,24	3,67	7,09	1,81	191,23	28	4,72	1,68	0	970
40 Sorg. Minerale Solf.	325	<0,001	14,5	6,29	1587	5,79	1222,3	212,00	5,32	0,12	286	56,5	36,5	8,95	0	1828
41 Ponte Anticoli 2	328	-	11,5	6,86	710	0,46	537	8,87	7,09	7,46	113,03	30	8,4	1,3	0	713
42 Sorg. Le Gorghe	360	<0,02	11,4	7,07	622	0,35	429,6	10,64	8,86	5,63	121,7	10,3	6,54	1,97	0	595
43 Sorg. Acqua Calda	655	<0,001	15,8	-	-	-	720	8,50	10,64	45,30	234,2	18,5	3,12	0,72	0,04	1041
44 P. Rocca di Botte	650	-	13,1	7,57	425	0,32	286,8	1,77	8,86	0,87	103,5	18,7	3,97	2,65	0,03	427
45 Pozzo Tiburtina	315	-	12,6	7,01	732	0,2	549,2	12,41	8,86	2,35	136,1	25,4	5,75	2,43	0	743
46 Pozzo Baglia	665	-	13,3	7,45	-	-	303,9	7,09	12,4	0,59	58,2	13,2	6,06	3,39	0	405
47 Sorg. Fosso Floggio	550	0,04	12,2	8,3	385	7	268,5	1,77	8,86	0,34	80,3	4,6	3,41	0,78	0,01	369
48 P. Giordani	630	-	12,2	7,06	-	-	524,8	8,87	12,4	0,93	115,7	12,6	6,88	1,93	0	684
49 Pozzo de Angelis	630	-	11,8	6,83	850	101	512,6	69,16	16	15,60	101,5	18,7	3,29	0,45	0	737
50 Pozzo Nocchie	320	-	12,9	6,3	1715	-	1366,8	12,41	8,86	0,22	163,2	21,6	3	0,76	0,05	1577
51 Fonte Unica	-	<0,001	13,5	7,72	350	1,67	268,5	0,00	5,32	0,09	80,3	10,4	2,9	0,75	0	368
52 Sorg. Solfurea Aniene	315	-	15,2	5,77	1456	2	1013	584,00	32,64	0,19	343	24,6	45,6	7,56	0,05	2051
53 Acque Aibule (Tivoli)	70	2	24,5	6,15	2970	35,6	1574,32	842,50	125,8	-	590	108	143	31	0,2	3415
54 Cotilia (Governa et al.)	409	-	14,8	7,5	1419	-	2032	270,60	42,54	-	639,3	85,3	31,05	5,47	-	3106

← 0,08

Tab. 1.1 - Caratteri chimici e chimico-fisici delle acque analizzate. I valori di temperature dell'acqua, pH, cond. el., concentrazione ione bicarbonato e torbidità sono stati determinati direttamente sul campo all'atto del prelievo dei campioni.

1.5.1. Unità fisiografica del medio Aniene - Torrente Bagnatore.

Il settore considerato comprende le pendici nord-occidentali del rilievo carbonatico simbruino tra gli abitati di Agosta ed Arsoli, il settore settentrionale dei Monti Ruffi tra gli abitati di Marano Equo ed Anticoli Corrado, in riva sinistra del F. Aniene, ed i rilievi meridionali dei Monti Sabini s.s., tra gli abitati di Roviano e Riofreddo, separati dalla dorsale simbruina dall'unità fisiografica del Torrente Bagnatore (Fig. 1.3).

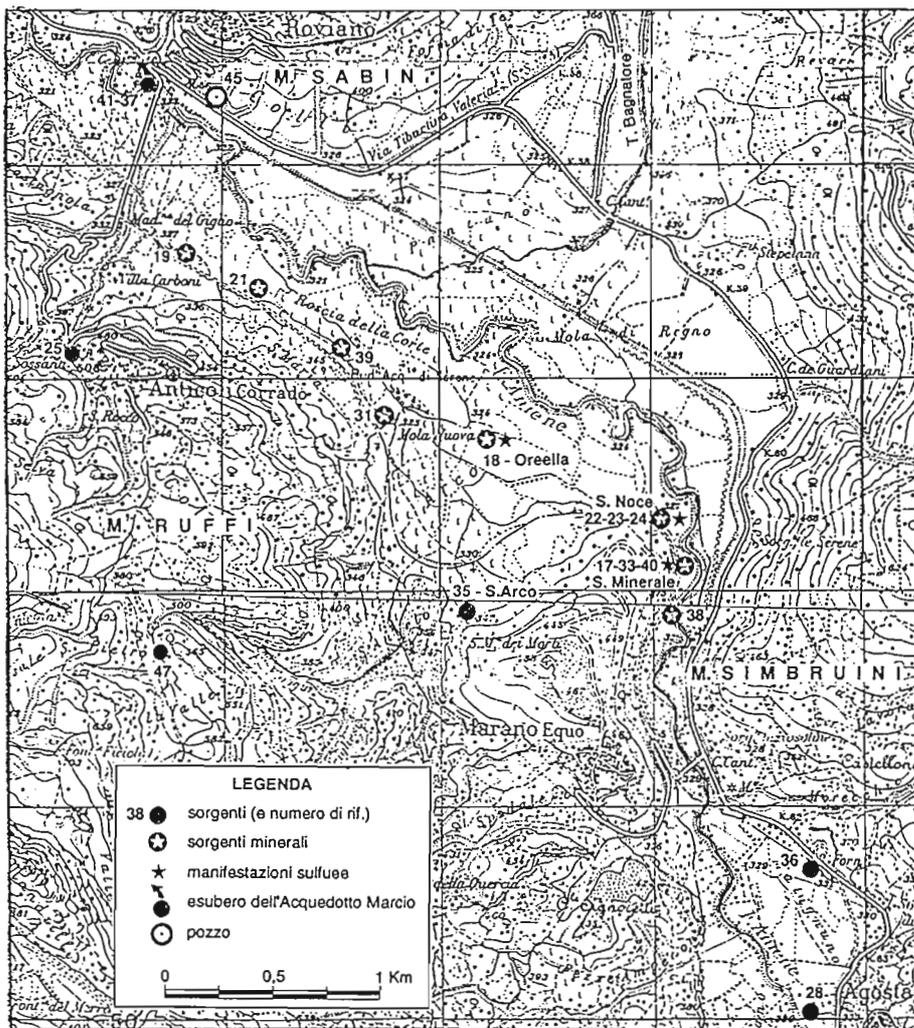


Fig. 1.3 - Ubicazione dei campioni analizzati (Sorgenti di Agosta; sorgenti minerali di Marano Equo)

1.5.1.1. Descrizione dei campioni analizzati

Le acque naturali campionate nel settore del Fiume Aniene compreso tra Subiaco ed Anticoli Corrado sono state suddivise in tre gruppi sulla base dei dati di chimismo, isotopici e del sistema acquifero di riferimento: (i) Sorgenti di Agosta (Acqua Marcia s.l.), (ii) Sorgenti minerali di Marano Equo, (iii) Sorgenti dei Monti Ruffi. Alle Sorgenti di Agosta fanno riferimento i campioni n. 28, 35, 36, 37, 41 (Tab. 1.2). Le acque della Sorgente Muricella (28)

e Mola di Agosta (36), ubicate in riva destra del F. Aniene nei pressi dell'omonimo abitato, costituiscono la parte residua delle emergenze naturali captate dall'ACEA, per l'approvvigionamento idropotabile di Roma (Fig. 1.3).

ril.	campione	quota	Portata (m ³ /s)	T (°C)	pH	Cond.(20°C) (µS/cm)	Torb. (NTU)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁼ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Ce ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Fe mg/l
53	Acque Albule (Tivoli)	70	2	24,5	6,15	2970	35,6	1574,3	842,5	125,8		590,0	108,0	143,0	31,0	0,2
52	Sorg. Solfurea Aniene	314	-	15,2	5,77	1456	2	1013,0	584,0	32,6	0,2	343,0	24,6	45,6	7,6	0,1
17	S. Minerale Marano E.	325		14,1	6,42	1372	0,16	1031,2	17,7	8,9	0,0	210,5	36,5	3,4	1,6	0,0
33	Sorg. Minerale Fe	325	<0,001	13,6	6,4	1329	0,22	1018,0	23,1	5,3	0,3	201,3	28,7	3,5	1,6	0,1
40	Sorg. Minerale Solf.	325	<0,001	14,5	6,29	1587	5,79	1222,3	212,0	5,3	0,1	286,0	56,5	36,5	9,0	0,0
22	Sorg. Noce	325	<0,01	13,2	6,26	1935	0,22	1623,1	21,3	8,9	0,3	189,3	31,4	4,7	3,3	0,1
23	Sorg. Noce Solf.	325	<0,01	17,2	6,11	2380	0,94	1891,6	186,5	5,3	0,8	386,0	68,5	38,9	8,7	0,2
24	Sorg. Noce Fe	325	<0,01	12,4	6,53	985	0,33	732,2	10,6	5,3	0,2	368,0	26,6	3,5	1,2	0,1
18	Sorg. Auriella	324	<0,01	15,5	6,3	2110	57	1708,6	265,0	8,9	0,2	386,5	82,3	56,3	7,6	0,1
19	Sorg. Castagnole 1	330	<0,001	13	6,54	1072	0,26	823,8	4,6	3,6	0,1	186,8	30,0	4,6	1,4	<0,01
21	Sorg. Archileo	330	<0,001	13,2	6,5	1080	0,24	805,5	21,3	5,3	0,4	191,6	32,5	4,7	1,4	<0,01
31	Sorg. Mola Nuova	328	<0,001	12,2	6,74	846	0,3	610,2	3,3	3,6	1,2	162,2	25,0	4,0	0,4	0,0
38	Sorg. Vagno	324	<0,001	12,3	6,98	685	0,36	476,0	1,5	10,6	0,2	136,6	25,9	3,1	0,7	0,0
39	S.S. Maria	340	<0,001	12,9	6,63	960	1,1	732,2	3,7	7,1	1,8	191,2	28,0	4,7	1,7	0,0
36	S. Mola di Agosta	330	-	10,1	7,08	505	0,31	378,3	1,8	5,3	0,5	115,3	22,3	2,3	0,6	0,0
28	Sorg. Muricella	337	<0,001	11,8	7,14	560	0,35	402,7	1,0	7,1	1,8	114,6	21,5	3,2	0,5	0,0
35	Sorg. Arco	328	0,04	11,5	7,15	600	0,36	427,1	12,4	8,9	0,4	121,6	20,7	3,8	0,7	0,0
37	Ponte Anticoli 1	328	-	11	6,94	641	1,5	512,6	8,9	7,1	0,6	100,2	21,5	3,2	0,7	0,0
41	Ponte Anticoli 2	328	-	11,5	6,86	710	0,46	537,0	8,9	7,1	7,5	113,0	30,0	8,4	1,3	0,0
45	Pozzo Tburina	315	-	12,6	7,01	732	0,2	549,2	12,4	8,9	2,4	136,1	25,4	5,8	2,4	0,0
25	Sorg. Sossanti	500	0,002	12	7,75	408	0,37	274,6	3,5	8,9	0,2	95,0	8,5	3,7	0,9	0,1
47	Sorg. Fosso Foggio	550	0,04	12,2	8,3	385	7	268,5	1,8	8,9	0,3	80,3	4,6	3,4	0,8	0,0

Tab. 1.2 - Caratteri chimici e chimico-fisici delle acque del settore Marano Equo - Agosta (Fig. 1.3).

Le acque di Ponte Anticoli 1 e 2 (37 e 41) costituiscono l'esubero dell'acquedotto Marcio, a valle delle captazioni di Agosta. Esse rappresentano pertanto il prodotto di miscelazione delle emergenze derivate verso la Capitale. La portata media dello sfioro, mantenutasi costante durante il periodo di osservazione, è risultata pari a circa 1 m³/s. La Sorgente dell'Arco (35) è l'unico punto d'acqua tra quelli del gruppo di Agosta ubicato in riva sinistra del Fiume Aniene; esso è posto ai limiti di un piccolo affioramento di rocce carbonatiche (~1,8 Km²) su cui giace Marano Equo, appartenenti al dominio di piattaforma (Parotto & Praturlon, 1975). Nelle immediate vicinanze del rilievo affiorano i depositi flyschoidi arenacei (Tortoniano) riferibili all'unità di Frosinone (Corrado, 1995). Tali litotipi sono presenti in affioramento al piede della struttura dei Monti Ruffi, nel settore compreso tra gli abitati di Marano Equo e Anticoli Corrado. La sorgente dell'Arco, con portata media di circa 0,1 m³/s, ha fatto rilevare durante il ciclo idrologico osservato un regime di flusso molto regolare (Fig. 1.4). L'emergenza si presenta distribuita lungo un fronte di circa 15 m al piede dello sperone calcareo, da cui si origina un fosso che raggiunge il Fiume Aniene dopo circa 1 Km.

Le Sorgenti minerali di Marano Equo (Fig. 1.3) vengono considerate separatamente per le differenze di chimismo rilevate sia rispetto alle Sorgenti di Agosta sia a quelle dell'unità dei Monti Ruffi. In particolare, tali emergenze sono ubicate ai limiti delle pendici orientali dei Ruffi,

caratterizzati da sequenze in *facies* marnoso-calcarenitica del Miocene basale, e i depositi flyschoidi e alluvionali dell'Aniene, alla quota di circa ^{325 m} 340 m. Le sorgenti "Minerali di Marano" ← (campioni n. 17, 33, 40) e Noce (22, 23, 24) sono localizzate ai limiti dello sperone calcareo da cui emergono anche le Sorgenti dell'Arco (35), al contatto con i depositi alluvionali dell'Aniene. Queste emergenze presentano i più alti tenori di mineralizzazione e di temperatura tra le acque rilevate nel settore. Le portate risultano esigue, valutabili nel complesso a 4-5 l/s, sebbene assai stabili nel corso dell'anno, particolarmente nei periodi di magra pronunciata (Fig. 1.4).

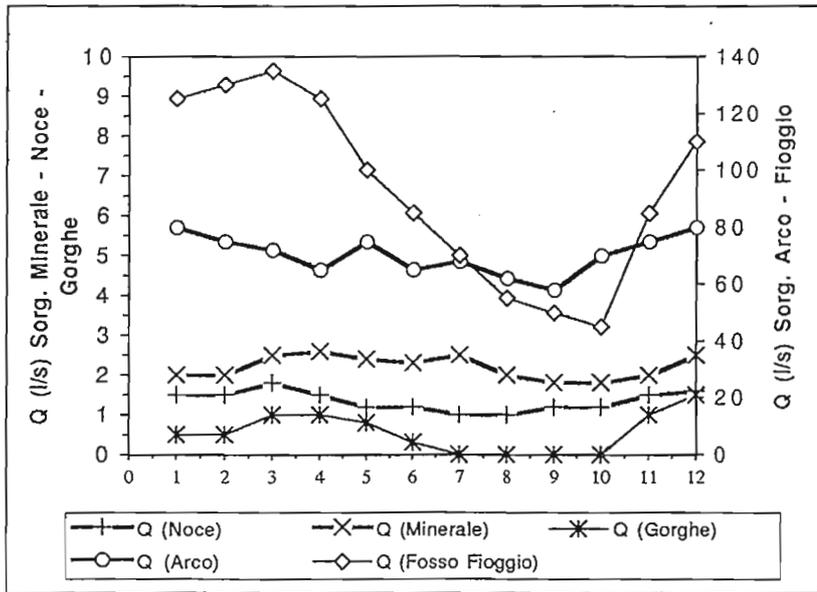


Fig. 1.4 - Variazione mensile (1996) delle portate delle sorgenti Arco, Minerale, Noce (Marano Equo), Gorghe (Bagnatore) e del Fosso Fioggio, alimentato dalla omonima sorgente.

Sia le sorgenti "Minerali" che Noce sono costituite ciascuna da più venute d'acqua su fronti di qualche metro, caratterizzate da chimismo sensibilmente differente. Così, alle acque "Minerali" corrispondono tre sorgenti, ciascuna con caratteristiche composizionali proprie: sorgente "Minerale" (17), sorgente Minerale Ferrosa (33), sorgente Minerale Solfurea (40). Quest'ultima, in particolare, ubicata a circa 10 m di distanza dalle altre, forma una polla d'acqua opalescente incrostante, con evidenti venute gassose sotto forma di gorgoglio. Anche la sorgente Noce è costituita da tre venute differenti, note come Sorgente Noce s.s. (22), ricca in CO₂ e apprezzata dai locali per uso idropotabile, sorgente Noce Ferrosa (24), con emergenza posta immediatamente accanto alla precedente, e la sorgente Noce Solfurea (23) che forma una polla dalle caratteristiche analoghe alla sorgente Minerale Solfurea (40). La sorgente Oreella (o Auriella) (18), forma uno specchio d'acqua opalescente di piccole dimensioni (~25 m²) e della profondità massima di circa 2 m nella piana alluvionale dell'Aniene a circa 250 m di distanza dal fronte dei M. Ruffi. Al centro del piccolo lago sono particolarmente evidenti venute gassose

(CO₂, H₂S) mentre non si rilevano ai limiti dello specchio d'acqua concrezioni di travertino in formazione.

Le sorgenti 19, 21, 31, 38 e 39 sono ubicate al piede dei Monti Ruffi, nei pressi di Anticoli Corrado, al contatto con i depositi alluvionali della piana del F. Aniene. Tali emergenze sono disposte secondo un allineamento orientato circa NO-SE della lunghezza di 3 Km (Fig. 1.3). Il chimismo di tali acque è nel complesso uniforme, caratterizzato da una matrice a bicarbonati alcalino-terrosi e tenori di salinità compresi tra 1000 e 600 mg/l. L'insieme di questi campioni rappresenta un sottogruppo con minore mineralizzazione e termalità di quello costituito dalle acque "Minerali" di Marano, Noce ed Orella. A queste ultime, nelle considerazioni sui caratteri geochimici delle acque, sono state associate la sorgente "Solfurea sul F. Aniene" (52), che emerge a valle del settore in esame alla quota di 315 m, e le Sorgenti Albule presso Bagni di Tivoli. Inoltre, dai dati disponibili in letteratura, sono state considerate per confronto le acque di Cotilia (Governa *et al.*, 1989).

Le sorgenti riferite all'unità morfo-strutturale dei Monti Ruffi sono quelle di Sossanti (25), presso Anticoli Corrado, alla quota di 500 m e con portata media di circa 4 l/s, e del Fioggio (47) che alimenta l'omonimo fosso alla quota di circa 550 m. Entrambe le emergenze sono ubicate lungo la linea di sovrascorrimento delle formazioni calcarenitiche mioceniche in *facies* sabina (M. Ruffi) sul *flysch* arenaceo-argilloso tortoniano, associato alla piattaforma carbonatica laziale-abruzzese. Il chimismo di queste acque si discosta dalle precedenti matrici liquide per la minore mineralizzazione e la differente connotazione sia chimico-fisica che isotopica ($\delta^{18}\text{O}$).

1.5.1.2. Presentazione dei dati e discussione

1.5.1.2.1 Salinità, temperatura e ione bicarbonato

In Tab. 1.2 sono raccolti i risultati delle analisi chimiche relative alle acque del settore nord-occidentale della struttura simbruina (Fig. 1.3). I dati chimico-fisici rilevati sul campo all'atto del prelievo dei campioni, si riferiscono ai seguenti parametri: temperatura dell'acqua (°C), conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C), pH, ione bicarbonato (mg/l HCO₃⁻), torbidità (NTU). Un primo esame dei dati riportati in tabella evidenzia sensibili variazioni di mineralizzazione e di temperatura tra i campioni esaminati. Le acque minerali di Marano Equo presentano valori di conducibilità elettrica compresi tra 2400 e 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mentre quelli delle sorgenti di Agosta sono variabili tra 700 e 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (28, 35, 36, 37, 41). Anche i valori di temperatura evidenziano lievi ma significative differenze tra le matrici liquide riferibili alle sorgenti di Agosta, più fredde (~10-11 °C) e a quelle idrotermali s.l. di Marano Equo (~15-13°C). Si tratta di temperature basse in assoluto, minori di quelle di Tivoli (n.53: 24,5 °C) o di altre manifestazioni termali a solfuri note nell'appennino centrale (Zuppi *et al.*, 1974). La relazione che lega il grado di mineralizzazione alla temperatura risulta evidente come appare dal grafico di

Fig. 1.5. In tale diagramma i valori misurati presentano una buona correlazione, con l'eccezione delle acque riferite alla struttura dei Monti Ruffi (25, 47).

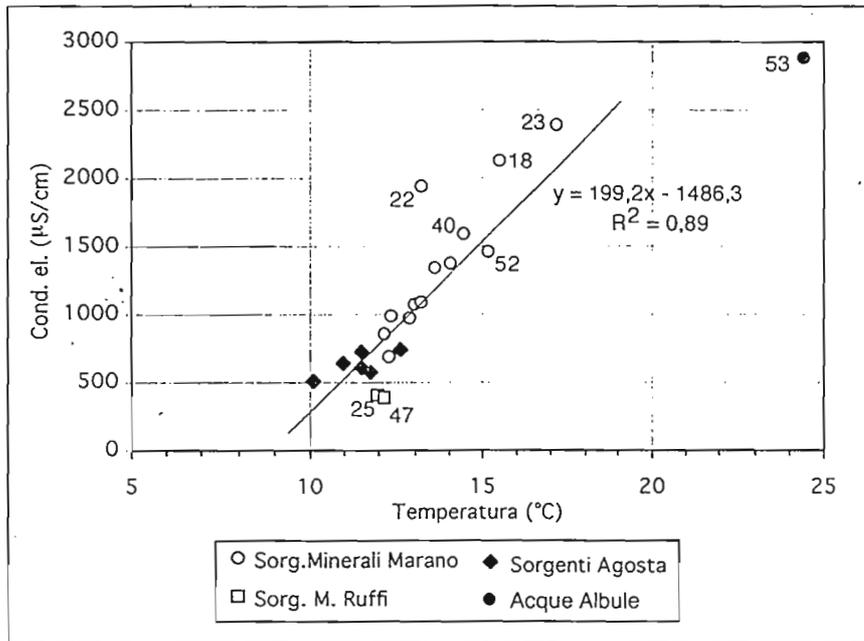


Fig. 1.5 - Diagramma di correlazione 'Conducibilità elettrica - temperatura'. Con l'esclusione dei campioni riferiti ai rilievi dei monti Ruffi (25 e 47), si nota la buona correlazione ($R^2 = 0,89$) tra i campioni in esame.

Queste, in effetti, non rientrano nel sistema di miscelazione che legherebbe le acque carsiche a quelle di circolazione profonda e calde e a maggiore mineralizzazione. La diversa mineralizzazione delle acque analizzate dipende principalmente dal tenore in bicarbonati (Fig. 1.6) e subordinatamente dalle concentrazioni degli ioni solfato, cloruro e sodio.

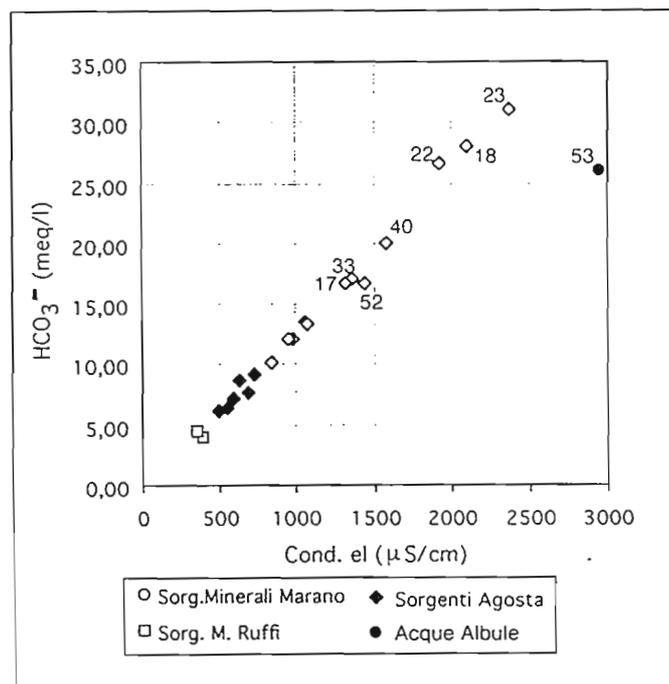


Fig. 1.6 - Diagramma di correlazione 'Conducibilità elettrica - conc. ione bicarbonato'.

1.5.1.2.2 Diagramma di reazione percentuale

Il diagramma di reazione percentuale dei costituenti maggiori (Fig. 1.7) evidenzia ancora più chiaramente la differente composizione chimica riconducibile a tre famiglie di acque [(i) Sorgenti di Agosta, (ii) Sorgenti minerali di Marano Equo, (iii) Sorgenti dei Monti Ruffi]. I punti rappresentativi di ciascun gruppo risultano approssimativamente allineati dal settore delle acque a bicarbonati alcalino-terrosi (Famiglia A), fino alle acque più solfato-clorurate di Tivoli (53) e della sorgente solfurea sul F. Aniene (52) (Famiglia C). Una terza famiglia di campioni (B) è situata in posizione intermedia tra le due (18, 23, 40) e corrisponde alle acque solfuree di Marano Equo. I punti rappresentativi della famiglia A si riferiscono (i) alle sorgenti di Agosta, bicarbonato-calciche, ivi compresa la Sorgente dell'Arco (35), e (ii) alle acque minerali s.l. di Marano Equo, con l'esclusione delle manifestazioni solfuree (18, 23, 40) che rientrano nella famiglia B.

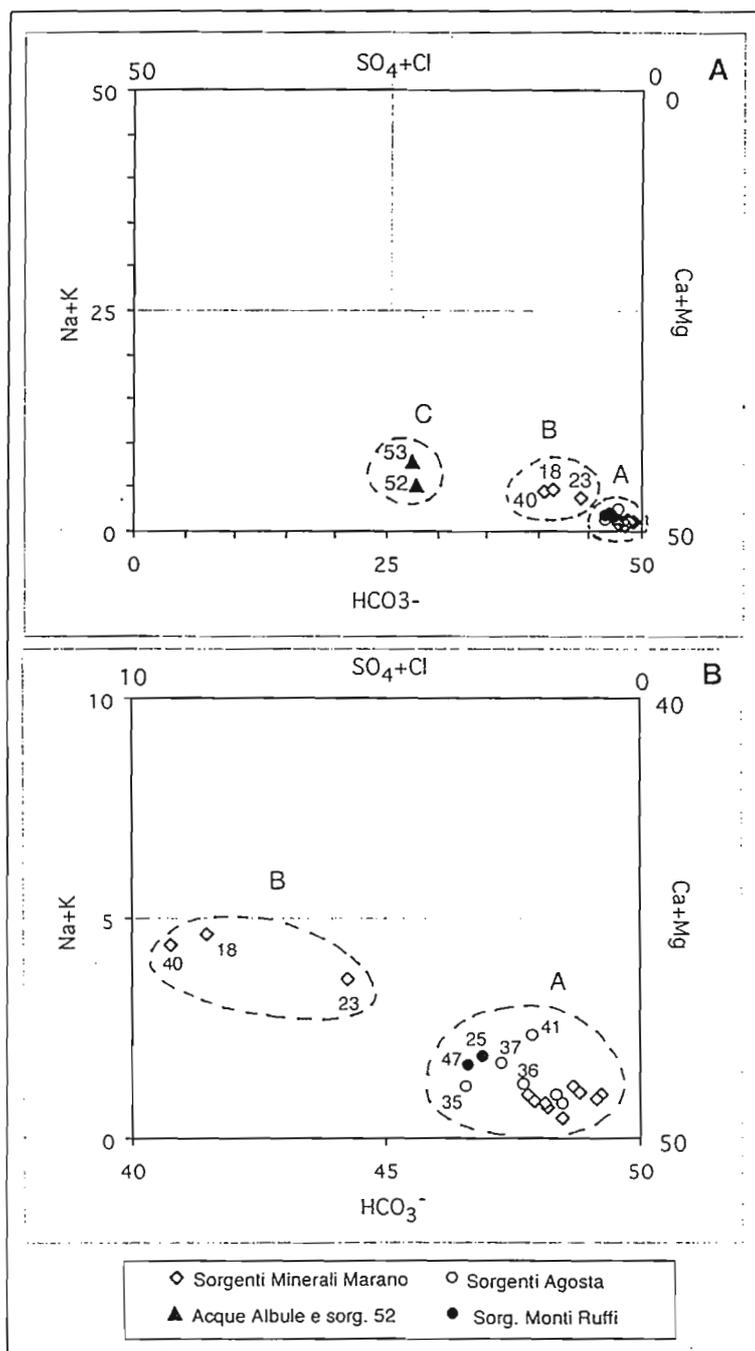


Fig. 1.7 - Diagramma di reazione percentuale dei costituenti chimici maggiori. B: ingrandimento del settore delle acque a bicarbonati alcalino-terrosi.

1.5.1.2.3 rCa/rMg

Il valore rCa/rMg (Fig. 1.10A) è pari a circa 3-4 sia per le acque di Agosta sia per quelle minerali s.l. di Marano Equo.

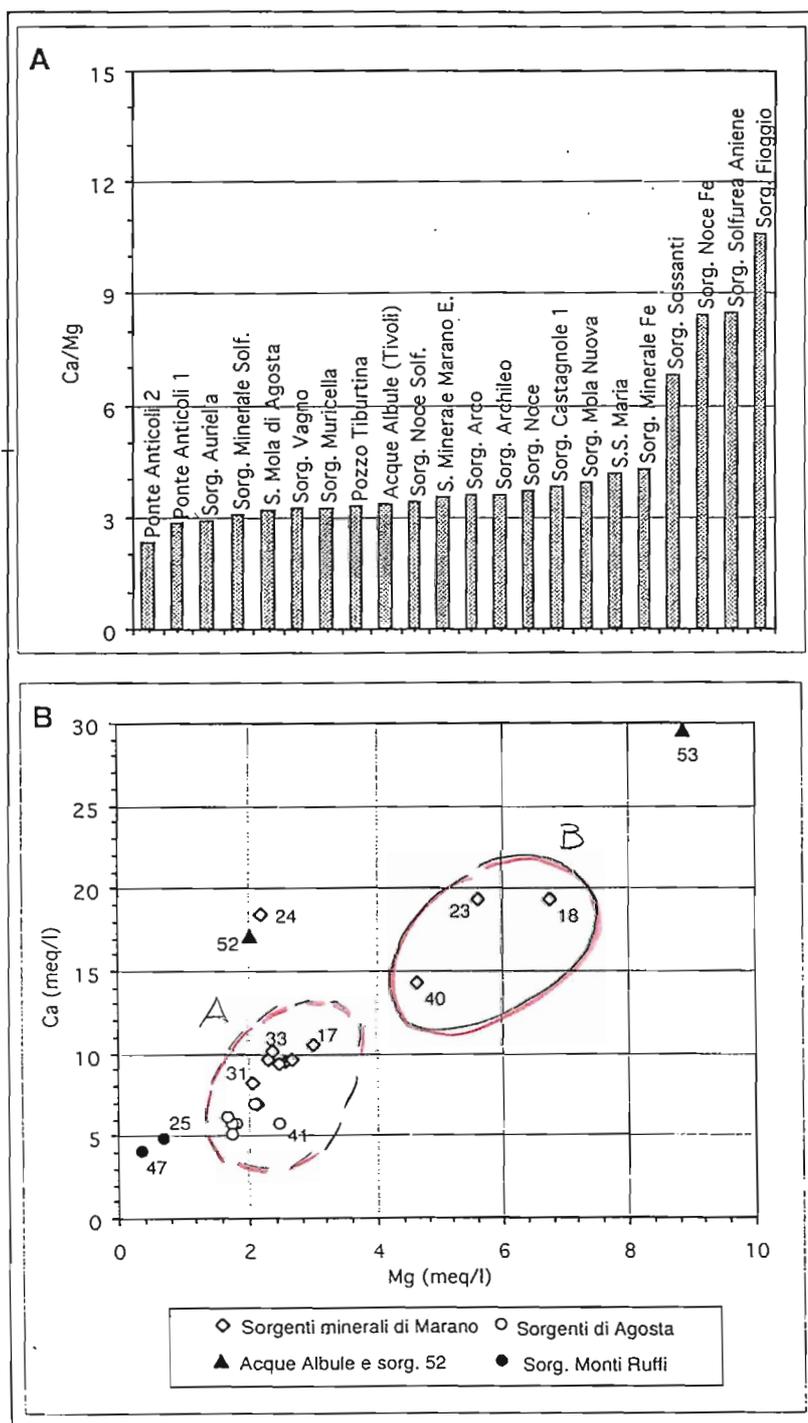


Fig. 1.10 - A: Rapporto Ca/Mg per i campioni analizzati. B: Diagramma di correlazione 'Concentrazione ione Calcio - conc. Ione Magnesio'. E' evidente la buona correlazione che lega i campioni delle sorgenti di Agosta a quelle minerali di Marano Equo.

Fa eccezione la sorgente Noce Ferrosa (24) con valore di 8,4 confrontabile con quello relativo alla Sorgente solfurea sul F. Aniene (52). Il grafico di Fig. 1.10A mostra come i valori del rapporto Ca/Mg, sostanzialmente confrontabili per le diverse matrici riferite agli areali di Agosta e Marano E., si dispongono secondo una regressione lineare (Fig. 1.10B) che denota processi di interazione con rocce simili per caratteristiche litologiche, ma con diversa intensità di scambio tra le due fasi, liquida e solida. Anche la connotazione chimica degli elementi maggiori è confrontabile per i due gruppi di acque (Fig. 1.7), mentre la maggiore mineralizzazione delle emergenze di Marano Equo sarebbe riferibile agli apporti di fluidi (prevalentemente gassosi) del circuito idrotermale profondo (Governata *et al.*, 1989; Brondi *et al.*, 1995).

1.5.1.2.4 Dati isotopici ($\delta^{18}\text{O}$)

(Determinazioni eseguite dal Dott. L. D'Amelio (1996), presso il laboratorio dell'Istituto di Geochimica e Mineralogia (Direttore Prof. A. Longinelli) dell'Università degli Studi di Trieste. Dati inediti)

La composizione isotopica ($\delta^{18}\text{O}$) delle acque riferite ai gruppi (i) e (ii) presenta una spiccata uniformità, circostanza che, associata alle considerazioni sopra esposte, fa ipotizzare una origine comune per le due matrici liquide (Fig. 1.11).

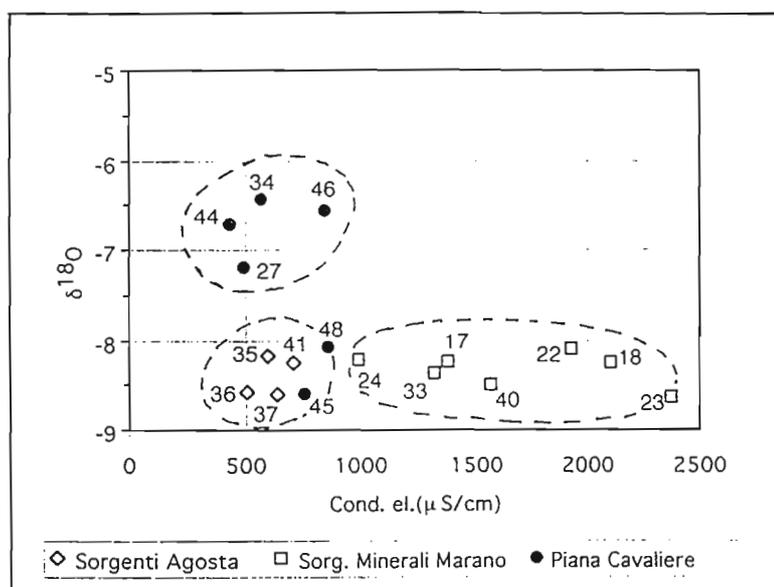


Fig. 1.11 - Diagramma di correlazione Conducibilità elettrica - $\delta^{18}\text{O}$. Sul grafico vengono distinte le famiglie riferite ai diversi circuiti sotterranei (sorg. Agosta; sorg. minerali di Marano; campioni della Piana del cavaliere).

In particolare, le acque minerali di Marano Equo, sia quelle solfuree che quelle ad elevato grado di mineralizzazione ma prive di apporti in H_2S , deriverebbero dal circuito carsico "superficiale" che alimenta le sorgenti di Agosta, con apporti di fluidi, prevalentemente gassosi e con lievi anomalie termiche positive, del circuito profondo. Verrebbe confermata, in tal modo, l'ipotesi

di continuità idraulica tra l'idrostruttura simbruina, sede del circuito carsico superficiale, e lo sperone carbonatico di Marano Equo ($\sim 1,8 \text{ Km}^2$) che, ubicato in riva sinistra dell'Aniene, riceve ai limiti del rilievo apporti gassosi di origine profonda.

Questa conclusione viene confortata dall'analisi del regime di flusso delle sorgenti ubicate alla periferia del rilievo di Marano Equo. La portata complessiva erogata ($\sim 120 \text{ l/s}$), sebbene di limitato valore se confrontata con quella delle Sorgenti di Agosta ($\sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$), risulta sostanzialmente costante nel ciclo idrologico annuo (1996-1997), con deboli decrementi nel periodo di magra (agosto-settembre). Tale evidenza non sarebbe coerente con l'ipotesi di un'area di alimentazione delle emergenze identificabile unicamente con lo sperone carbonatico di Marano Equo. Oltre alla regolarità del regime di flusso, anche la connotazione chimico-fisica delle acque e la composizione isotopica non evidenziano il segnale stagionale, coerentemente con un'area di alimentazione ben più estesa di quella circoscritta al rilievo carbonatico di Marano ($\sim 1,8 \text{ Km}^2$).

Si fa rilevare inoltre come la sorgente Arco oltre ad essere la più rappresentativa in termini di portata ($\sim 100 \text{ l/s}$) tra le emergenze note ai limiti del rilievo di Marano Equo, presenti il minor valore di conducibilità elettrica ($\sim 600 \mu\text{S/cm}$) tra le acque di quell'areale e assenza di emissioni gassose peraltro evidenti alle sorgenti minerali di Marano e alla Sorgente Noce, quest'ultima più prossima ad Arco e distante circa $0,5 \text{ Km}$.

Orbene, quanto osservato per la Sorgente Arco trova forti analogie con la caratterizzazione del gruppo sorgentizio di Agosta ($\sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$), sia per la regolarità del regime di flusso, sia per il grado di mineralizzazione, sia per la mancanza di apporti gassosi oltre che per i tenori di ($\delta^{18}\text{O}$). Apparentemente, l'interazione tra le acque del circuito carsico simbruino con i fluidi gassosi di origine profonda si manifesta in una fascia ristretta della pianura che dai limiti dello sperone di Marano Equo si estende sino ad Anticoli Corrado, interessando le emergenze allineate lungo la direttrice appenninica Sorgente Noce - Sorgente Castagnole (Fig. 1.3). Si sottolinea come tali manifestazioni risultino evidenti in particolare presso le più piccole emergenze, con portata liquida al più di qualche l/s . Tali acque (famiglia B), compresa la piccola sorgente solfurea sul F. Aniene (52), hanno subito nel loro ciclo evolutivo un arricchimento in sodio e potassio (Tab. 1.2), non rilevabile nella matrice liquida riferibile al circuito carsico superficiale che alimenta sia il gruppo di Agosta sia la Sorgente dell'Arco (35). Questa circostanza confermerebbe l'evidenza di un diverso schema di circolazione delle acque "minerali", alle quali si associano fluidi profondi che hanno interagito con depositi argillosi (Unità di Frosinone ?).

Il modello di circolazione che si ipotizza sulla base delle conoscenze geologiche e strutturali del settore in esame, viene schematicamente riportato nella sezione di Fig. 1.12. Circa l'origine dei fluidi profondi, si fa riferimento alle conoscenze acquisite attraverso gli studi a carattere regionale reperibili in letteratura (Governa *et al.*, 1989, Duchi *et al.*, 1992, Boni *et al.*, 1980),

ipotizzando nel caso in esame la lisciviazione di rocce evaporitiche (Triassico sup.) note altrove alla base della serie carbonatica mesozoica.

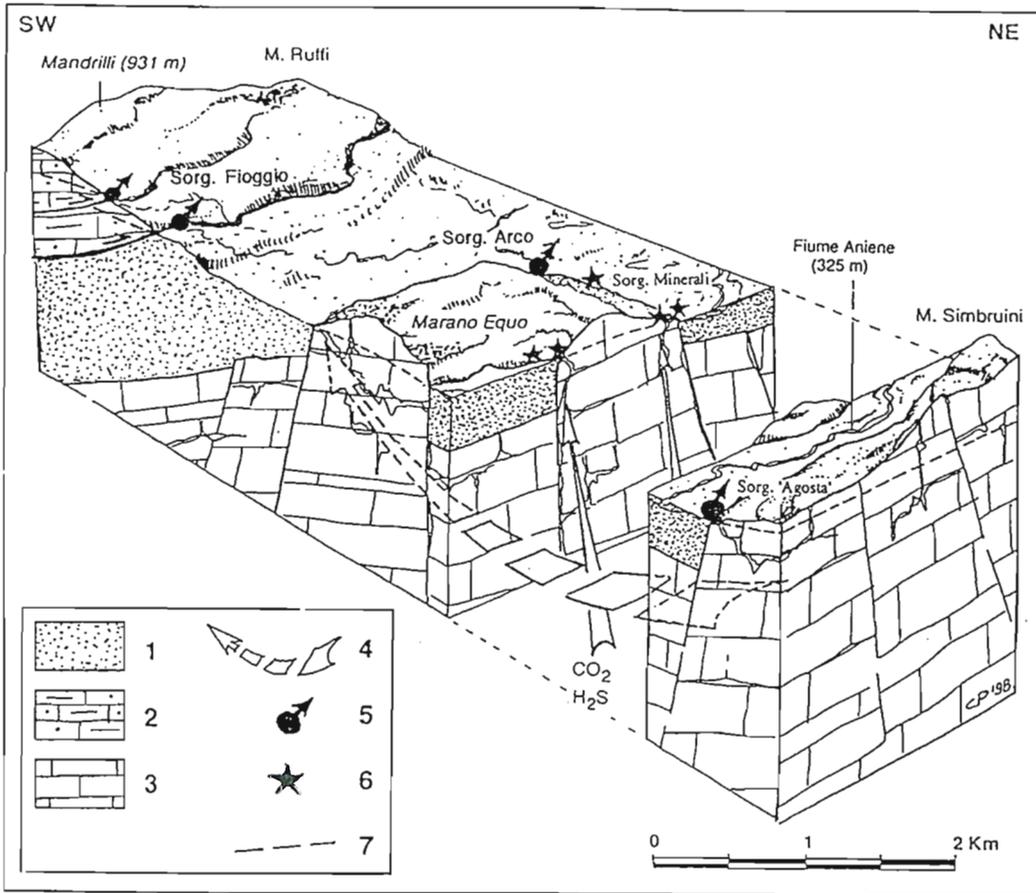


Fig. 1.12 - Modello di circolazione sotterranea attraverso un profilo idrogeologico schematico 'Monti Ruffi - Marano Equo - Monti Simbruini'. Legenda: 1) Complesso dei *Flysch* arenacei s.l. (Miocene - Pliocene p.p.); 2) Complesso di transizione marnoso-calcarenitico (Miocene p.p.); 3) Complesso di piattaforma carbonatica, indifferenziato (Trias inf. - Miocene p.p.); 4) Direzione di flusso delle acque sotterranee; 5) Sorgenti principali; 6) sorgenti minerali e manifestazioni gassose; 7) Traccia della superficie piezometrica.

1.5.1.3. Bacino del Torrente Bagnatore

Il flusso perenne del Torrente Bagnatore ed il regime dell'asta fluviale, rivestono particolare interesse nel quadro dei rapporti idraulici tra la falda di base dell'idrostruttura simbruina e le unità meso-cenozoiche sabine. Esso riceve, infatti, contributi in acque sotterranee nel tratto di valle del suo corso ("sorgenti lineari"), nel settore compreso tra l'abitato di Arsoli e la piana del F. Aniene. Il monitoraggio idrodinamico delle acque sia fluviali (T. Bagnatore, 26 in Tab. 1.1) che sorgentizie (Le Gorghe, 42) condotto con periodicità mensile, ha messo in evidenza il legame esistente con il regime delle precipitazioni locali. La sorgente Le Gorghe (42), ubicata lungo l'alveo del Bagnatore alla quota di 350 m in corrispondenza del tratto d'asta caratterizzato dai più marcati incrementi lineari di portata, presenta una connotazione chimica ed isotopica

confrontabile con le acque sorgentizie del gruppo di Agosta (Sorg. Mola di Agosta). Il tratto di alveo del Bagnatore nel quale si sono registrati i maggiori incrementi di flusso, in media di 0,25 m³/s nel 1996 tra le quote di 360 e 340 m, presenta un valore isotopico medio delle acque ($\delta^{18}\text{O}$) pari a -8,4‰ (maggio-luglio 1996) confrontabile con quello delle sorgenti di Agosta, prossime a 325 m di quota. A valle dell'abitato di Arsoli, nel tratto in cui il Torrente Bagnatore lambisce il rilievo carbonatico simbruino, il chimismo delle acque in alveo cambia sensibilmente verso una maggiore mineralizzazione ed arricchimento negli ioni bicarbonato e calcio se confrontato con quello del tratto d'asta più montano, a valle di Riofreddo. Questa evidenza associata alle considerazioni sopra riportate circa il chimismo e la connotazione isotopica della sorgente Le Gorghe (Tab. 1.1) nonché al regime di flusso dell'asta fluviale, consente di precisare in modo inequivocabile l'alimentazione del Bagnatore da parte della falda carsica basale che alimenta, alla quota di 325 m, le sorgenti di minor quota del gruppo di Agosta. Nel tratto in esame, il corso del Bagnatore rappresenterebbe così un limite a flusso imposto dell'acquifero regionale simbruino.

Per quanto riguarda le acque sotterranee presenti nei depositi di copertura della Piana del Cavaliere, ubicata a monte del bacino del Bagnatore, si rileva una sensibile differenza nei valori dei parametri chimico-fisici ed isotopici con quelle sorgentizie, puntuali e lineari, che alimentano il citato corso d'acqua (Fig. 1.17). Queste considerazioni consentono di escludere che il Bagnatore possa ricevere contributi comunque significativi dalla falda dei depositi di copertura fluvio-lacustre e vulcanici, che colmano la Piana del Cavaliere.

1.5.2. Unità fisiografica dell'alto Aniene - alto Liri

La caratterizzazione geochemica delle acque riferibili ai differenti circuiti carsici "interni" alla struttura simbruina che alimentano "Intra massif springs" (Governa *et al.*, 1989), individua un'unica matrice liquida bicarbonato-calcica con tenori di salinità compresi tra $\overline{300}$ e 450 mg/l (Tab. 1.3).

n. campione (Gen-Dic 1996)	quota	Portata (m ³ /s)	T (°C)	pH	Cond.el. (mS/cm)	Torb. (NTU)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁼ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	NO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ⁺⁺ (mg/l)	Mg ⁺⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Fe mg/l
1 F. Aniene a Subiaco	365	8,25	9,9	8,54	296	1,24	238	10,25	7,09	0,6	54,26	8,09	2,85	0,46	0
2 Sorg. Inferniglio	504	0,3	9,2	7,96	275	0,33	224	1,25	10,64	0,55	65,16	5,49	2,77	0,47	0
3 Sorg. Pertuso	699	2,55	7	8	251	0	199	5,8	7,09	0,14	62,16	8,52	2,04	0,41	0
4 Sorg. Acqua Nera	990	0,003	7,5	7,64	344	0,29	303	1,25	7,09	0,14	50,72	21,86	1,92	0,03	0
5 Sorg. Capo d'Acqua	772	0,06	9,7	7,35	302	0,26	232	3,32	7,09	0,05	76,15	1,72	3,07	0,28	0
6 Sorg. Ceraso	625	0,48	8,5	7,36	258	0,53	199	1,25	7,09	0,21	66,78	3,34	2,36	0,31	0,02
7 Sorg. Jenne	825	<0,001	9,8	7,86	346	0,31	276	1,25	10,64	0	85,13	5,04	3,48	0,08	0
8 Sorg. La Foce	650	0,94	7,8	7,38	238	0,28	196	3,32	3,55	0,17	52,12	3,34	1,98	0,26	0
9 Sorg. La Mola	630	0,57	9,9	7,85	268	1,08	220	5,8	3,55	0,32	52,12	6,01	2,77	0,51	0
10 Sorg. Moscose	1600	0,003	3,7	7,27	207	0,25	173	3,32	7,09	0,88	50,42	0,65	1,48	0,55	0
11 Sorg. Cardelline	558	0,025	12,4	7,6	341	0,42	271	5,8	7,09	0,14	80,47	2,82	4,28	0,21	0
12 Sorg. Comunacque	560	-	10,2	7,58	317	0,23	255	3,32	12,41	0,17	101,08	7,3	3	0,42	0,03
13 Sorg. del F. Liri	950	-	6,4	7,83	283	0,44	222	3,32	7,09	0,24	52,75	10	1,98	0,55	0,01
14 Stillicidio Inferniglio	520	-	9,1	8,15	275	0,2	237	1,25	7,09	0,45	76,15	13,18	3,82	0,11	0
15 Sorg. Le Tartare	565	0,06	9	7,53	331	0,41	260	11,22	10,64	0,94	76,15	3,09	3,91	0,67	0
16 Sorg. Zompo Schioppo	731	-	8,3	7,97	237	0,36	193	0	3,55	0,17	50,07	6,01	1,43	0,24	0
29 Sorg. Fiolo Vecchia	975	0,03	9,8	7,6	358	0,2	268,5	1,24	3,55	0,15	64,71	17,5	1,94	2,27	0
30 Sorg. Fiolo Nuova	975	0,01	6,7	7,7	360	0,2	270,5	1,25	3,6	0,15	61,71	18,7	1,94	2,3	0

Tab. 1.3 - Caratteri chimici e chimico-fisici delle acque del bacino del F. Aniene e delle sorgenti del Liri (13) e di Zompo Lo Schioppo (16).

1.5.2.1. Diagramma di reazione percentuale

I punti rappresentativi dell'alto Aniene sul diagramma di reazione percentuale dei costituenti chimici maggiori (Fig. 1.13), si dispongono nel settore delle acque bicarbonato-alcantino-terrose, come del resto quelli riferiti alle sorgenti di Agosta e di Marano Equo. In particolare queste ultime presentano un tenore percentuale maggiore degli ioni bicarbonato-alcantino-terrosi, verosimilmente a causa di un più lungo tempo di interazione dell'acqua con la roccia serbatoio carbonatica. Anche la salinità totale delle emergenze del medio Aniene (600-700 mg/l), non evidenziabile nel diagramma di Fig. 1.13, risulta sensibilmente superiore a quella delle acque sotterranee interne all'idrostruttura carsica dell'alto Aniene. Queste ultime presentano i più bassi valori di temperatura registrati nell'intero settore, anche in relazione alla quota più elevata delle emergenze.

A differenza di un regime più regolare evidenziato dalle sorgenti periferiche alla idrostruttura simbruina (Agosta, Bagnatore e Liri) durante il ciclo idrologico annuo, le emergenze del circuito carsico "interno" presentano una marcata variabilità stagionale, con esaurimento totale della portata in alcune di esse (p.e. La Foce). La sorgente Inferniglio (2, Fig. 1.14), ad esempio,

posta alla quota di 504 m in prossimità dell'alveo del Fiume Aniene, presenta una variabilità stagionale della portata erogata pari a due ordini di grandezza (0,1 - 10 m³/s).

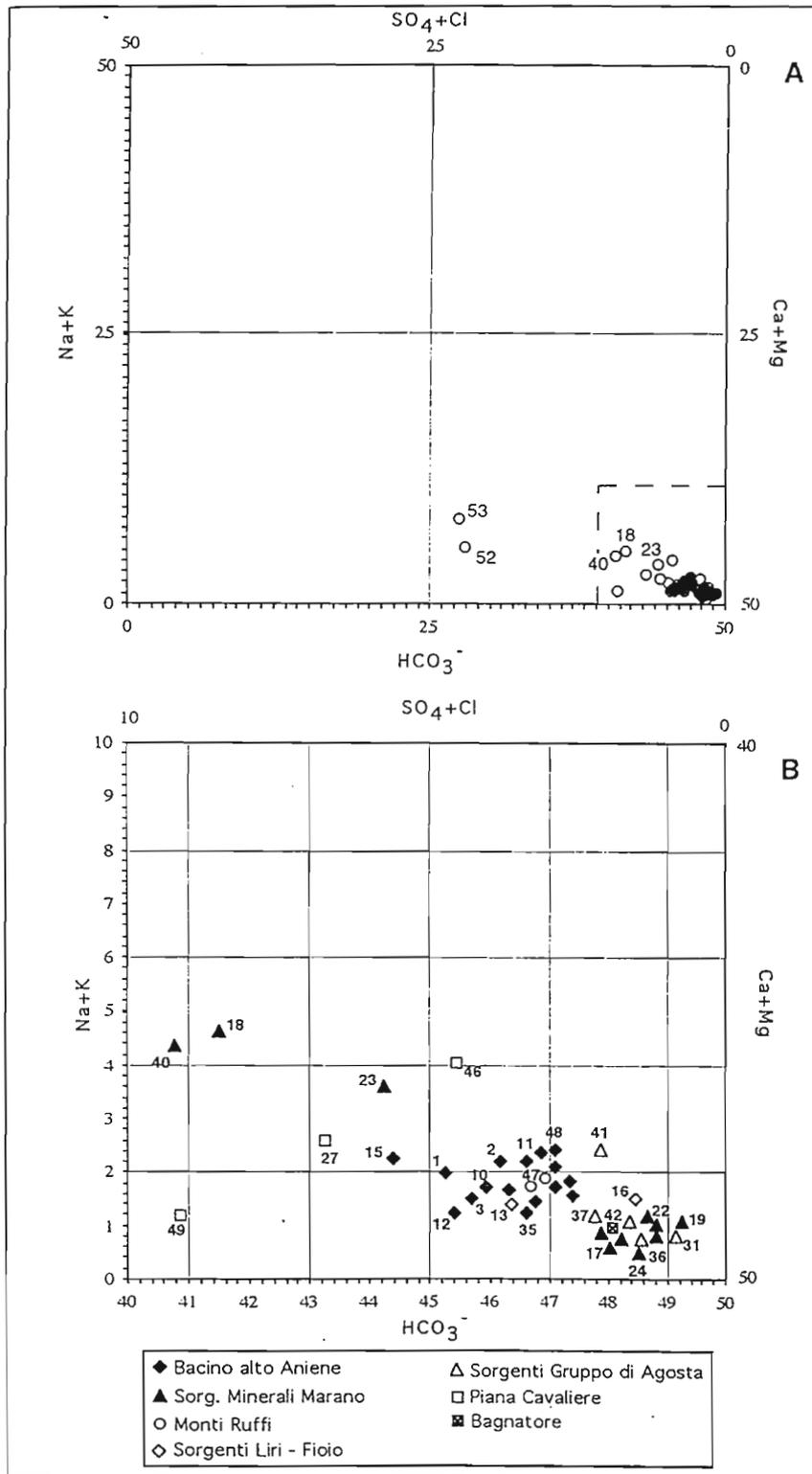


Fig. 1.13 - Diagramma di reazione percentuale dei costituenti chimici maggiori dei campioni analizzati. B: ingrandimento del settore delle acque a bicarbonati alcalino-terrosi.

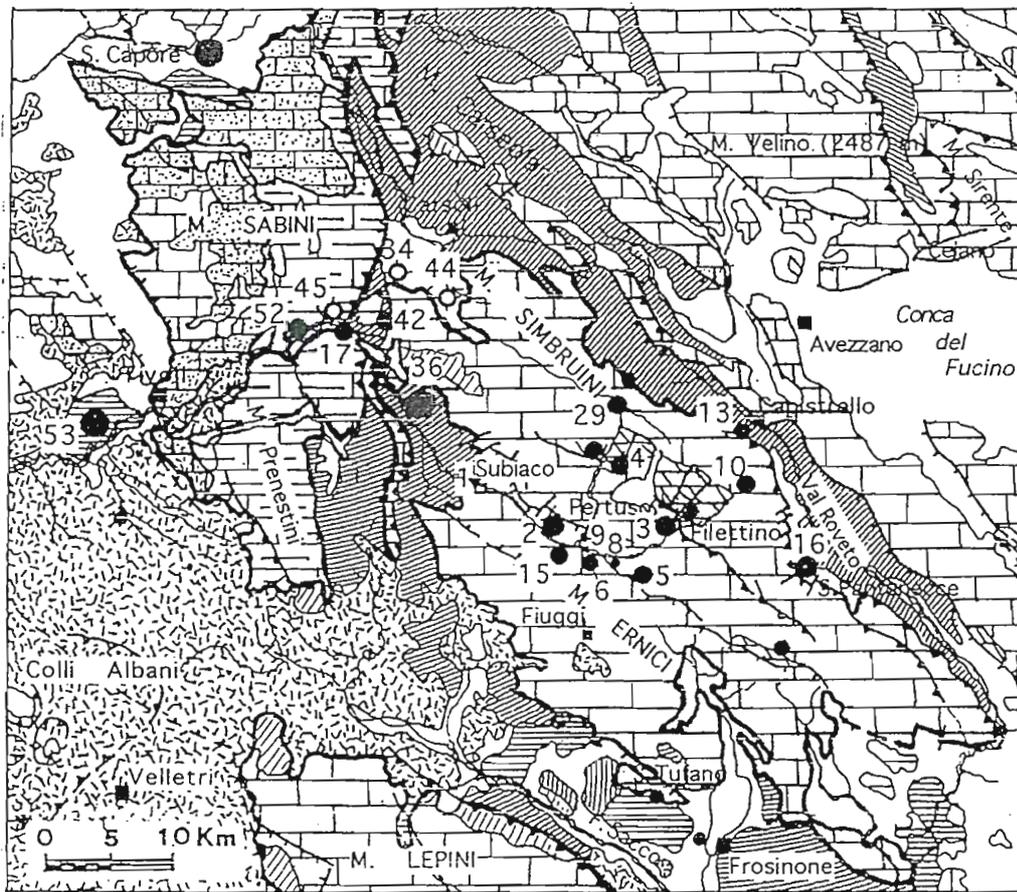


Fig. 1.14 - Ubicazione dei campioni. La legenda dello schema idrogeologico è quella di Fig. 1.1.

1.5.2.2. rCa/rMg

Sebbene la natura geochimica delle acque superficiali e sotterranee dell'alto Aniene sia fortemente omogenea, la variazione percentuale dello ione magnesio che si rileva nelle matrici analizzate, consente di differenziarne più sottogruppi ciascuno caratteristico dei processi di interazione con i litotipi dominanti della serie locale. Così, sulla base dei tenori rCa/rMg (Fig. 1.15, Tab. 1.4) vengono riconosciute due matrici liquide principali: (i) la prima, con valore minore di 4 viene riferita al dominio dolomitico e calcareo-dolomitico della serie basale mesozoica, largamente affiorante nel settore montano del bacino dell'Aniene; (ii) la seconda, con valore superiore a 8, è caratterizzata da circuiti sotterranei che si sviluppano in litologie più schiettamente calcaree. Tra le due matrici riconosciute (i, ii), esiste un gruppo con rCa/rMg intermedio (iii), riferibile a circuiti in litologie di tipo misto (Sorg. Pertuso, 3; Sorgente Infernioglio, 2; Sorgente La Mola, 9; Fig. 1.14). In questi sistemi le acque, analizzate con periodicità mensile, evidenziano processi di miscelazione tra una matrice riferibile al circuito epicarsico, più ricca in Ca^{2+} , ed una riferibile al flusso di base, caratterizzata da incrementi in Mg^{2+} . L'interazione di queste matrici in rapporto al regime degli afflussi, provoca sensibili oscillazioni stagionali dei tenori rCa/rMg , tanto più evidenti per i sistemi carsici in cui maggiore

è il contributo dell'epicarso (Sorg. del Pertuso, 3; Sorgente Inferniglio, 2). In altri sistemi (Sorgente Tartare, 15; Sorgente Cardelline, 11; Sorgente Ceraso, n.6; Fig. 1.14) appartenenti al gruppo con rCa/rMg maggiore di 8 (ii), sebbene sia ipotizzabile un contributo anche cospicuo da parte di matrici del serbatoio epicarsico sospeso, la natura francamente "calcarea" delle acque all'emergenza ne maschera l'evidenza rendendo così necessari altri criteri di analisi per la discriminazione delle due componenti. Al gruppo delle acque con valori rCa/rMg compresi tra 2 e 4 (i) appartengono gran parte delle sorgenti del settore montano del bacino, nell'area di Vallepietra e Filetino (Sorg. Acqua Nera, 4; Acqua Santa, Sorgenti Carpinetto, Pantano, Cardelline).

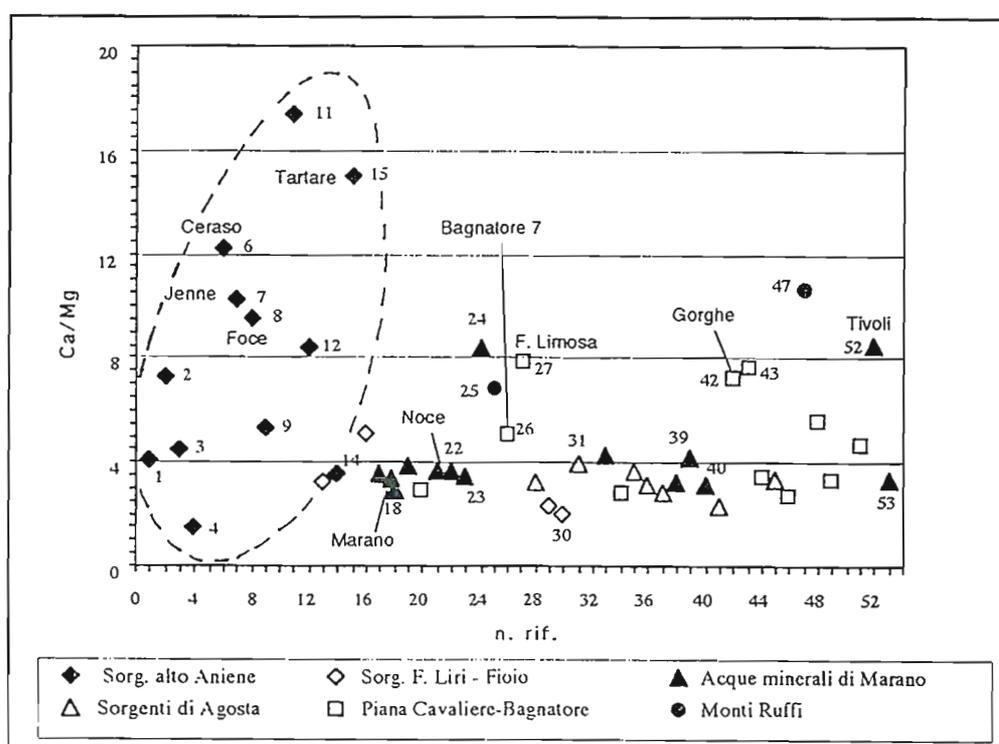


Fig. 1.15 - Rapporto Ca/Mg. Si nota la maggiore eterogeneità del rapporto per i campioni del bacino imbrifero del F. Aniene.

Rientrano in questo gruppo anche le sorgenti del Fosso Fioio (29 e 30, note come sorgenti di Camerata), ubicate al di fuori dei limiti del bacino idrografico dell'Aniene, a nord dell'anfiteatro dolomitico di Vallepietra, e le Sorgenti del Liri (13), presso Cappadocia.

I dati disponibili indicherebbero che la roccia serbatoio con cui interagisce l'acqua di infiltrazione che alimenta le sorgenti del Liri (13), si identifichi soprattutto nelle unità calcareo-dolomitiche a tetto del substrato regionale triassico in affioramento tra Vallepietra e Filetino. In particolare, in questo settore appenninico il substrato dolomitico triassico svolgerebbe il ruolo di soglia idraulica che sostiene la falda carsica basale a cui fanno riferimento sia le sorgenti della

alta Val Roveto (p.e. Liri, 13), sia le sorgenti dell'alto Simbrivio oggi interamente derivate dal sistema acquedottistico del Consorzio Simbrivio (VAS).

Sebbene alle sorgenti Fioio (29, 30) si riferiscano valori di rCa/rMg di 2,2, indicativi di processi di interazione con rocce dolomitiche o di depositi comunque ricchi in magnesio, va precisato che esse sono alimentate da una falda sospesa nell'epicarso, ivi rappresentato da termini del Cretacico superiore.

Le sorgenti di Agosta (Fig. 1.15) appartengono al gruppo delle acque intermedie (iii), con valori rCa/rMg compresi tra 2 e 4. Tale evidenza suggerirebbe, oltre all'interazione con litologie prevalentemente calcareo-dolomitiche, una rilevante omogeneizzazione chimica delle acque alla base della idrostruttura carsica (Fig. 1.16), associata a condizioni idrodinamiche uniformi nella zona satura dell'acquifero regionale.

Le condizioni chimico-idrodinamiche della falda basale che alimenta il gruppo di Agosta e le emergenze in riva sinistra dell'Aniene tra Marano Equo ed Anticoli Corrado, non consentono di rilevare il segnale climatico-idrologico stagionale. Questa circostanza è coerente con la regolarità del regime di flusso delle sorgenti e delle captazioni ACEA, per complessivi $5 \text{ m}^3/\text{s}$ circa.

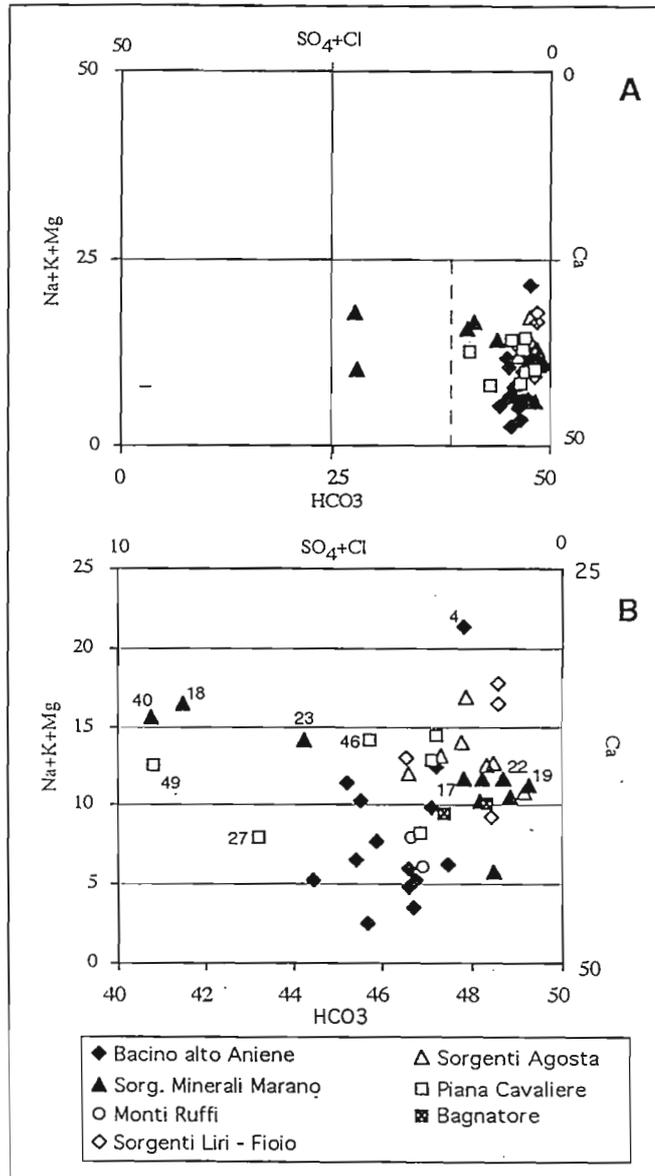


Fig. 1.16 - Diagramma di reazione percentuale modificato: i cationi sono stati divisi in Na+K+Mg, da una parte, e Ca dall'altra. B: ingrandimento del settore delle acque a bicarbonati alcalino-terrosi.

Le captazioni sono costituite da sistemi di cunicoli di drenaggio ubicati poco a valle dei punti di emergenza naturale della falda di base e paralleli al piede del versante carbonatico in cui si collocavano, in origine, le sorgenti del Gruppo di Agosta.

Le captazioni ACEA, profonde alcuni metri dalla quota di emergenza naturale della falda di base, hanno interrotto definitivamente l'erogazione spontanea delle sorgenti, con il conseguente raccordo della piezometrica alla livelletta dei cunicoli di drenaggio. Tali condizioni idrauliche determinano l'estrazione di volumi prevalenti di "riserve" della falda carsica regionale, che consentono di regolarizzare la portata richiesta dall'utenza oltre che derivare acque di fondo maggiormente omogenee sia sotto il profilo chimico che isotopico.

<i>rif.</i>	<i>Bacino alto Aniene</i>	<i>rCa/rMg</i>	<i>rif.</i>	<i>Sorgenti Agosta</i>	<i>rCa/rMg</i>
1	F. Aniene a Subiaco	4,07	35	S. Arco	3,56
2	Sorg. Inferniglio	7,20	36	S. Mola di Agosta	3,14
3	Sorg. Pertuso	4,43	37	Ponte Anticoli 1	2,83
4	Sorg. Acqua Nera	1,41	31	S. Mola Nuova	3,94
14	Stillicidio Inferniglio	3,50	28	S. Muricella	3,23
7	Sorg. Jenne	10,25	41	Ponte Anticoli 2	2,29
8	Sorg. La Foce	9,47	45	Pozzo Tiburtina	3,25
9	Sorg. La Mola	5,26	<i>Monti Ruffi</i>		
12	Sorg. Comunacque	8,40	25	Sossanti	6,78
15	Sorg. Le Tartare	14,95	47	S. Fioggio	10,59
6	Sorg. Ceraso	12,13	<i>Sorgenti Liri - Fiolo</i>		
11	Sorg. Cardelline	17,31	13	Sorg. del F. Liri	3,20
<i>Sorg. Minerali Marano</i>			16	Sorg. Zompo lo Schioppo	5,05
17	S. Min.	3,50	29	S. Fiolo Vecchia	2,24
18	S. Auriella	2,85	30	S. Fiolo Nuova	2,00
19	S. Castagnole 1	3,78	<i>Piana Cavaliere-Bagnatore</i>		
33	S. Min. Fe	4,25	20	P. Comune Oricola	2,85
21	S. Archileo	3,58	27	Fonte Limosa	7,88
22	S. Noce	3,66	26	F.so Bagnatore 7	5,06
23	S. Noce Solf.	3,42	34	P. Campo Sp. Oricola	2,79
24	Noce Fe	8,39	42	S. Le Gorghe	7,17
38	S. Vagno	3,20	43	S. Acqua Calda	7,68
39	S.S. Maria	4,14	44	P. Rocca di Botte	3,36
40	S. Min. Solf.	3,07	48	P. Giordani	5,57
52	Sorg. Solfurea Aniene	8,46	49	Pozzo de Angelis	3,29
53	Acque Albule Tivoli	3,31	51	Fonte Unica	4,68
			46	Pozzo Baglia	2,67

Tab. 1.4 - Valori del rapporto Ca/Mg dei campioni analizzati (Tab. 1.1)

1.5.2.3. Dati isotopici ($\delta^{18}O$)

Le analisi eseguite con frequenza stagionale nel periodo 1995-1996 (D'Amelio, dati inediti) evidenziano come i valori medi delle sorgenti di Agosta e dell'insieme delle acque dell'alto Aniene, siano tra loro confrontabili (Fig. 1.17). Queste ultime, tuttavia, presentano al loro interno una maggiore variabilità sia relativamente ai diversi siti campionati, sia, per ciascuno di essi, nell'ambito del periodo stagionale. I dati acquisiti sarebbero coerenti con un modello di circolazione caratterizzato da:

a) un circuito profondo e lento, che alimenta le sorgenti di grande portata ubicate alla periferia dell'idrostruttura (sorgenti del gruppo di Agosta), in cui non è distinguibile il segnale

stagionale, né in termini di variazione del regime di flusso né relativamente alla composizione chimica ed isotopica delle acque;

b) un circuito breve e veloce, superficiale ed "interno" all'idrostruttura, con regime di flusso e caratteristiche chimico-fisiche ed isotopiche delle acque sorgentizie variabili stagionalmente anche in modo rilevante. In questi sistemi con palese segnale stagionale si riconoscono:

b1) un flusso di base alimentato da acque di circolazione profonda, uniforme sia dal punto di vista chimico che isotopico, di norma soprassaturo rispetto alla calcite;

b2) un flusso epicarsico che si sviluppa nella zona areata del serbatoio, caratterizzato da variazioni chimiche ed isotopiche oltre che stagionali anche nell'ambito dei singoli eventi di piena. Le acque del circuito epicarsico quando di recente infiltrazione nel serbatoio sospeso, risultano generalmente sottosature rispetto alla calcite.

Le modalità di flusso tipiche del settore interno dell'idrostruttura, derivano dalla interazione in proporzioni variabili delle matrici (b1) e (b2), secondo i cicli stagionali rilevabili dagli idrogrammi di portata sia del Fiume Aniene a Subiaco, sia della Sorgente Inferniglio nei periodi di flusso critico (cfr. Cap. 4). Si fa rilevare che le caratteristiche chimiche ed isotopiche del flusso di base (b1) delle sorgenti lineari dell'alto Aniene, a meno della salinità totale, risultano nel complesso simili a quelle delle emergenze periferiche alla idrostruttura simbruina (Gruppo di Agosta).

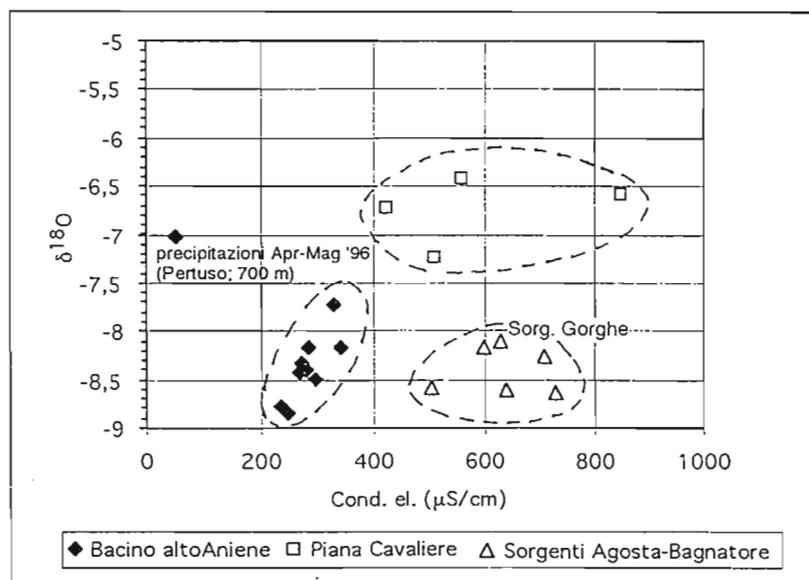


Fig. 1.17 - Diagramma di correlazione Conducibilità elettrica - $\delta^{18}\text{O}$. Sul grafico vengono distinte le famiglie riferite ai diversi circuiti sotterranei (sorg. Agosta; campioni del bacino del F. Aniene; campioni della Piana del cavaliere)

1.5.3. Unità fisiografica della Piana del Cavaliere

Al margine nord-occidentale la dorsale carbonatica simbruina risulta sepolta dai depositi flyschoidi del medio Aniene e del bacino del Bagnatore, mentre a Nord soggiace a coperture fluvio-lacustri e di vulcaniti pleistoceniche della conca del Cavaliere. I rilevamenti idrogeologici condotti nel 1996 nel settore Bagnatore - Piana del Cavaliere, hanno avuto l'obiettivo di precisare le condizioni ai limiti dell'idrostruttura simbruina, ad una scala di maggior dettaglio rispetto alle conoscenze acquisite da studi idrogeologici a carattere regionale (Boni *et al.*, 1986; Boni *et al.*, 1988).

I sedimenti alluvionali che colmano la conca del Cavaliere sono costituiti da ghiaie con giacitura lenticolare, in eteropia laterale e verticale a sedimenti lacustri argilloso-limosi e piroclastici plio-pleistocenici caratterizzati da bassa permeabilità d'insieme. I depositi ghiaiosi sono sede di una limitata circolazione sotterranea, localmente sfruttata per l'alimentazione idropotabile di alcuni centri abitati come Oricola, Rocca di Botte, Camerata Nuova. La caratterizzazione chimico-fisica ed isotopica ($\delta^{18}\text{O}$) delle acque sotterranee e la geometria dei serbatoi ruditici intercalari, permettono di escludere una alimentazione laterale dall'acquifero alluvionale verso il Bagnatore con flusso perenne (Fig. 1.17).

Sotto il profilo strutturale la falda alluvionale della Piana del Cavaliere risulta sospesa e discontinua. Esclusivamente alimentato dalla infiltrazione delle precipitazioni zenitali, l'acquifero alluvionale assume interesse locale ed evidenzia linee di flusso che convergono nel F. Turano.

Campagne mensili di misure di portata e chimico-fisiche delle acque del reticolo idrografico della Piana del Cavaliere, condotte nel periodo di magra 1996, hanno permesso di calcolare il contributo dell'acquifero alluvionale al F. Turano, pari a circa $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Circa la possibilità che parte delle acque che saturano i sedimenti alluvionali della conca del Cavaliere alimentino verticalmente le unità carbonatiche sottiacenti della idrostruttura simbruina, i dati acquisiti non consentono alcuna precisazione in merito. In primo luogo non è certo che i depositi lacustri argilloso-limosi costituiscano un orizzonte continuo a copertura delle unità carbonatiche mesozoiche sepolte. D'altra parte non sono noti i rapporti geometrici esistenti tra il substrato mesozoico sepolto e i depositi flyschoidi tortoniani, largamente affioranti a nord dell'abitato di Carsoli, nel settore settentrionale della Piana.

1.6. Considerazioni conclusive

1.6.1. Sorgenti di Agosta - Sorgenti Minerali di Marano Equo - Anticoli Corrado

Nel settore nord-occidentale dell'idrostruttura simbruino-ernica, al contatto con i depositi tortoniani in *facies* terrigena (Unità di Frosinone), sono presenti alcune sorgenti con diverse caratteristiche sia idrodinamiche che fisico-chimiche delle acque. Nei pressi di Agosta, in riva destra del Fiume Aniene, sono localizzate le principali sorgenti basali dell'acquifero simbruino, con caratterizzazione delle acque a bicarbonati alcalino-terrosi e regime di flusso nel complesso regolare. Tali emergenze evidenziano una marcata stabilità chimica non coerente con la variabilità delle precipitazioni. Al piede del fronte settentrionale dei Monti Ruffi, in riva sinistra del Fiume Aniene, sono ubicate numerose piccole emergenze molto mineralizzate. Con evidenti apporti gassosi (CO_2 , H_2S), la matrice chimica di base bicarbonato-alcalino-terrosa, associa elevati tenori in solfati e sodio. Queste acque derivano dall'interazione del circuito carsico superficiale che alimenta le sorgenti di Agosta, con fluidi di origine profonda, a bassa termalità, nel settore compreso tra lo sperone carbonatico di Marano Equo ed Anticoli Corrado, nella piana del F. Aniene. Evidenze idrodinamiche, di chimismo ed isotopiche ($\delta^{18}\text{O}$) inducono a sostenere una origine comune con le acque che alimentano le sorgenti di Agosta e conseguentemente continuità idraulica tra l'idrostruttura simbruina e l'affioramento di Marano Equo - Anticoli Corrado. Circa l'origine del circuito idrotermale di Marano Equo, si fa riferimento agli studi a scala regionale noti in letteratura, da cui deriva l'indicazione di una probabile interazione delle acque sotterranee con la successione evaporitica basale della serie laziale-abruzzese.

1.6.2. Bacino dell'alto Aniene - Sorgenti del Liri

Il Fiume Aniene, a monte di Subiaco, rappresenta uno dei maggiori corsi d'acqua dell'area appenninica laziale-abruzzese che, all'interno della catena carbonatica mesozoica, raggiunga la quota di saturazione dell'acquifero carsico basale. Nel bacino da esso identificato (alto Aniene) si sviluppano così condizioni di circolazione caratterizzate da circuiti veloci e brevi, con limitati tempi di residenza delle acque nel serbatoio carsico. Ne deriva una minore mineralizzazione delle acque "interne" alla catena carbonatica simbruina, se confrontate con quelle riferite alle sorgenti "esterne", periferiche alla idrostruttura, con circuiti nel complesso più lunghi. La caratterizzazione geochemica delle acque evidenzia una unica matrice, bicarbonato-calcica, sebbene siano identificabili sulla base dei valori $r\text{Ca}/r\text{Mg}$ due differenti famiglie, evolutesi dalla interazione con litotipi più dolomitici o viceversa più schiettamente calcarei della serie stratigrafica locale. Questi ultimi, in particolare, costituiscono la roccia serbatoio principale della falda regionale che satura l'idrostruttura simbruina.

Dall'analisi degli idrogrammi dell'Aniene a Subiaco e dei dati chimico-fisici delle acque fluviali, nel circuito carsico superficiale sono identificabili due componenti riferibili nello specifico: a) al flusso di base alimentato da risorse decisamente più omogenee che derivano dal reticolo di microfessure del serbatoio carbonatico; b) al circuito epicarsico, con connotazione chimico-fisica delle acque descritta da maggiori tenori di mineralizzazione, minori valori di pH, accentuata variabilità chimica della matrice liquida e regime di flusso molto variabile (Bono & Percopo, 1996).

← 1996

Il serbatoio epicarsico, a tetto della zona areata dell'acquifero carbonatico, presenta una spiccata connotazione calcica delle acque, rispetto a quella tendenzialmente più magnesiacca propria del flusso di base. Il settore dolomitico triassico di Filettino e Vallepietra, nel cuore del rilievo simbruino, costituisce un serbatoio con caratteristiche idrauliche differenti rispetto a quello più schiettamente calcareo tra le litologie presenti nel bacino dell'alto Aniene. Esso è sede di un acquifero poco trasmissivo ma dotato di maggiore capacità di immagazzinamento rispetto al serbatoio che si sviluppa nei litotipi più francamente calcarei a tetto della serie. Il substrato dolomitico triassico dell'alto Aniene costituisce, inoltre, lo spartiacque sotterraneo dei bacini di alimentazione delle sorgenti del Liri, a nord-est, e di quelle del F. Gari, preso Cassino, a sud-est.

1.6.3. Torrente Bagnatore - Piana del Cavaliere

La Piana del Cavaliere ed il bacino imbrifero del Torrente Bagnatore costituiscono gli elementi morfologici più caratteristici ai limiti della struttura carbonatica simbruina, nel settore nord-occidentale della catena appenninica. I dati acquisiti, idrologici e chimico-fisici delle acque, non consentono di giungere a conclusioni idrogeologiche definitive circa i rapporti tra queste unità e la falda di base che alimenta le sorgenti di Agosta. E' certo che le acque che saturano i depositi alluvionali della Piana del Cavaliere alimentino il reticolo idrografico del F. Turano, verso nord, con contributi in magra di circa 0,2 m³/s.

Il Torrente Bagnatore, nel tratto di alveo compreso tra Arsoli e il F. Aniene riceve contributi da sorgenti lineari per complessivi 0,25 m³/s. I dati acquisiti nel periodo 1996-1997, sebbene incompleti soprattutto nelle determinazioni isotopiche ($\delta^{18}\text{O}$), sono coerenti con l'alimentazione del Bagnatore da parte della falda carsica regionale che, poco più a sud e a quote lievemente minori, converge nel gruppo di sorgenti basali di Agosta e di Marano Equo - Anticoli Corrado.

Bilancio idrologico del bacino dell'alto Aniene

2.1. Introduzione

L'analisi del bilancio idrologico riferita all'area appenninica in esame, non può prescindere da una accurata valutazione delle modificazioni antropiche sul sistema naturale acquifero-fiume, conseguente alla derivazione delle acque superficiali per scopi idroelettrici.

In questo capitolo verranno discusse, in particolare, le analisi di bilancio relative (i) al periodo annuo medio 1926-1995 e (ii) all'anno idrologico 1994-1995.

2.2. Definizione dell'area di studio

Al bacino imbrifero dell'alto Fiume Aniene con chiusura a Subiaco (365 m), viene riferita una superficie di 216 Km² e quota media di 1140 m. L'area di dominio (216 Km²) è stata nuovamente planimetrata sulla base cartografica I.G.M. alla scala di 1:25.000, escludendo le aree carsiche endoreiche ai limiti della linea spartiacque (Fig. 2.1).

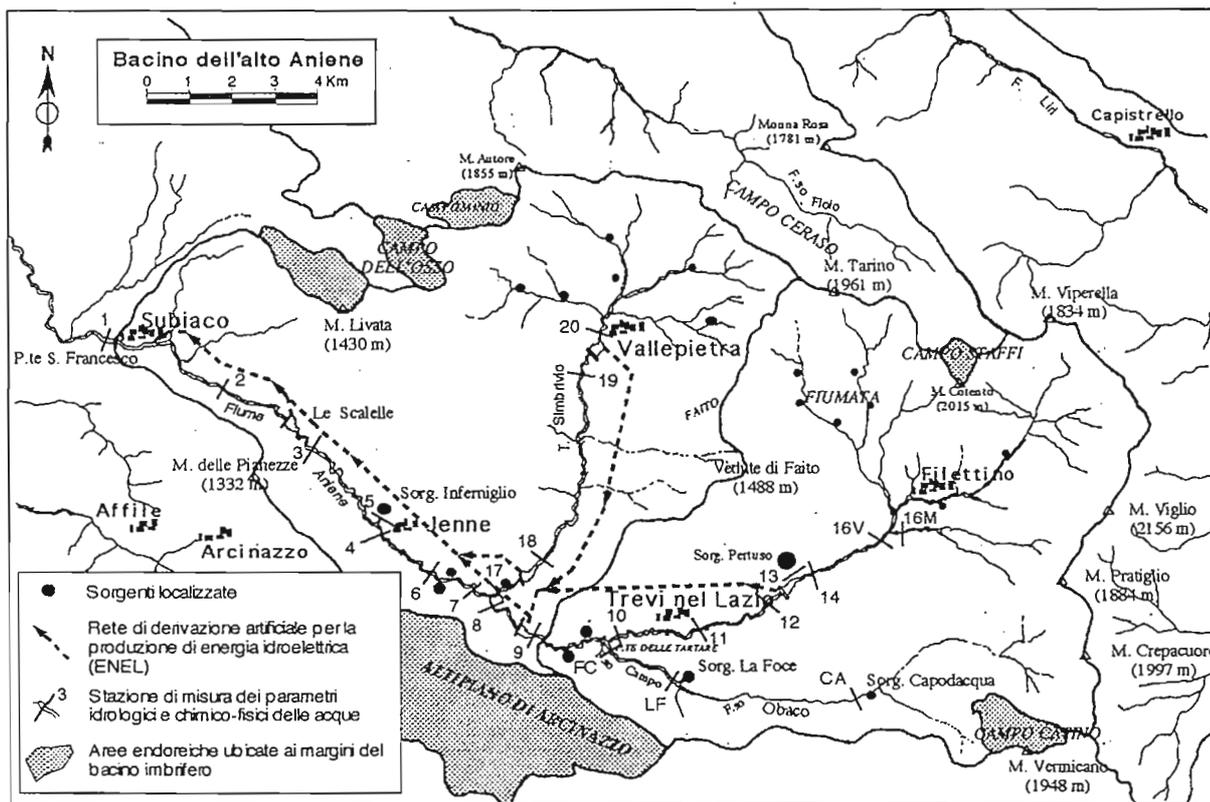


Fig. 2.1 - Schema rappresentativo del bacino imbrifero dell'alto F. Aniene (216 Km²)
Ubicazione delle stazioni di misura della portata e degli invasi e derivazioni ENEL.

Al citato bacino negli Annali Idrologici del Servizio Idrografico di Stato, viene attribuita la superficie di 233 Km², che verosimilmente include le conche carsiche periferiche a drenaggio interno. La massima culminazione dello spartiacque è rappresentata dal Monte Viglio (2156 m). Il dislivello massimo, pari a 1791 m, rende conto del carattere tipicamente montano dell'area interna alla catena simbruino-ernica, che si estende a monte di Subiaco.

Il fiume Aniene, con portata media a Subiaco di circa 8 m³/s (1926-1995), riceve i contributi del Torrente Simbrivio (portata media ~1,5 m³/s, 1995-1996) in riva destra, e di Fosso Campo - Fosso dell'Obaco in riva sinistra, quest'ultimo con regime di flusso effimero nel periodo di magra estiva. Lungo l'asta del F. Aniene sono distribuite numerose sorgenti carsiche, con portate comprese tra 1,5 m³/s (Sorgente Pertuso) e pochi litri al secondo.

2.3. Inquadramento geologico regionale

La catena simbruino-ernica fa parte dell'unità paleogeografica interna dello *shelf* laziale-abruzzese compresa tra la Val Roveto, a nord-est e la Valle Latina a sud-ovest (Fig. 2.2).

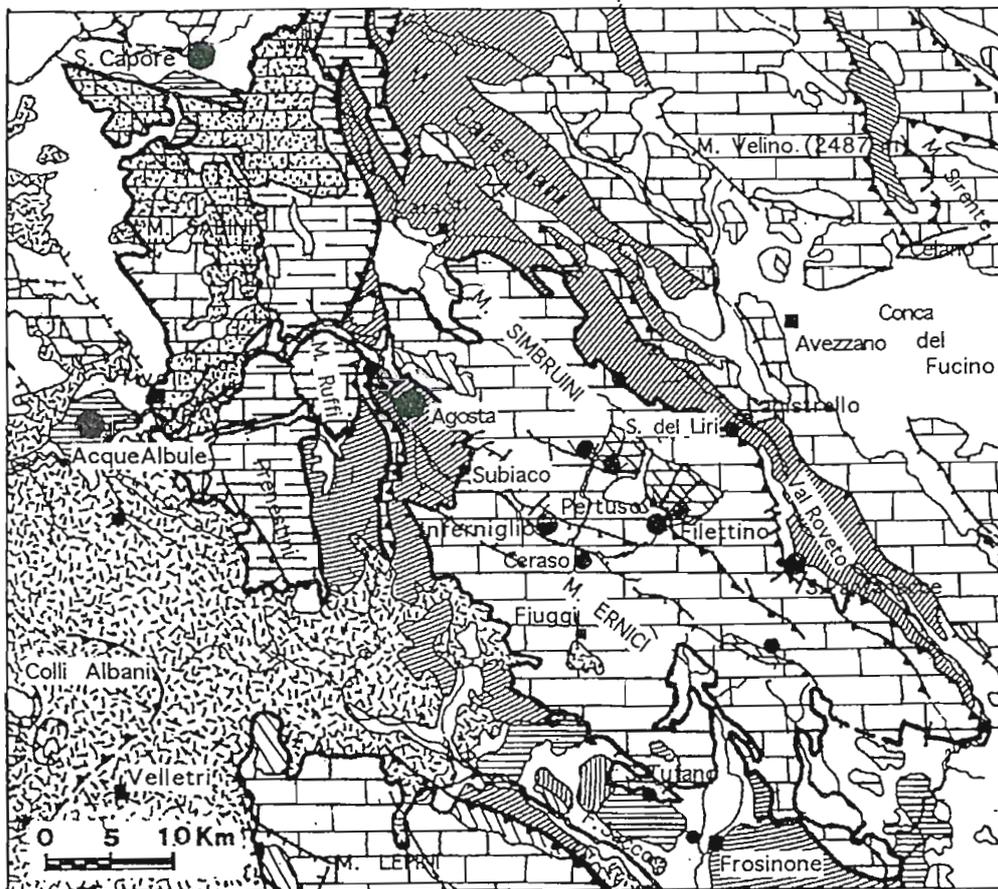


Fig. 2.2 - Schema idrogeologico dei Monti Simbruini ed Ernici (da Boni *et al.*, 1988, ridisegnato e modificato)

Essa è costituita da una successione di termini carbonatici dello spessore di circa 4000 m, depositi in continuità dal Triassico superiore al Cretacico superiore (Accordi *et alii*, 1988; Accordi, 1966; Damiani, 1990a, 1990b; Devoto, 1967a, 1970; Parotto e Praturlon, 1975). Ad essi seguono, dopo la lacuna paleogenica, i "Calcari a briozoi e litotamni" *Auct.* del Miocene medio (Serravalliano p.p. - Langhiano p.p.) e, successivamente, depositi ruditici e silicoclastici alto-miocenici. Nel Pliocene l'area in esame risulta ampiamente emersa, come conseguenza di un generale sollevamento della catena appenninica (Fig. 2.3).

Già nell'alto cretacico linee di debolezza interrompono l'unitarietà della piattaforma carbonatica, disarticolandola in più unità strutturali a blocchi. La fase compressiva alto-miocenica provoca un generale raccorciamento del dominio di piattaforma, con raddoppi di serie, *thrusts* e colmamento delle depressioni strutturali da parte dei depositi silicoclastici messiniani. Nel Pliocene e nel Quaternario la tettonica distensiva determina la formazione di sistemi di faglie che si sovrappongono ai motivi compressivi ereditati. L'assetto strutturale che ne deriva, comune alle altre catene appenniniche, è caratterizzato da monoclini sovrapposte ad embrici tramite piani di sovrascorrimento, ed accavallate sui depositi silicoclastici al fronte della unità corrugata (Devoto, 1967; Devoto e Parotto, 1967). Lungo il margine meridionale della dorsale vengono riconosciuti motivi tettonici, a scala regionale, di tipo distensivo (Beneo, 1943).

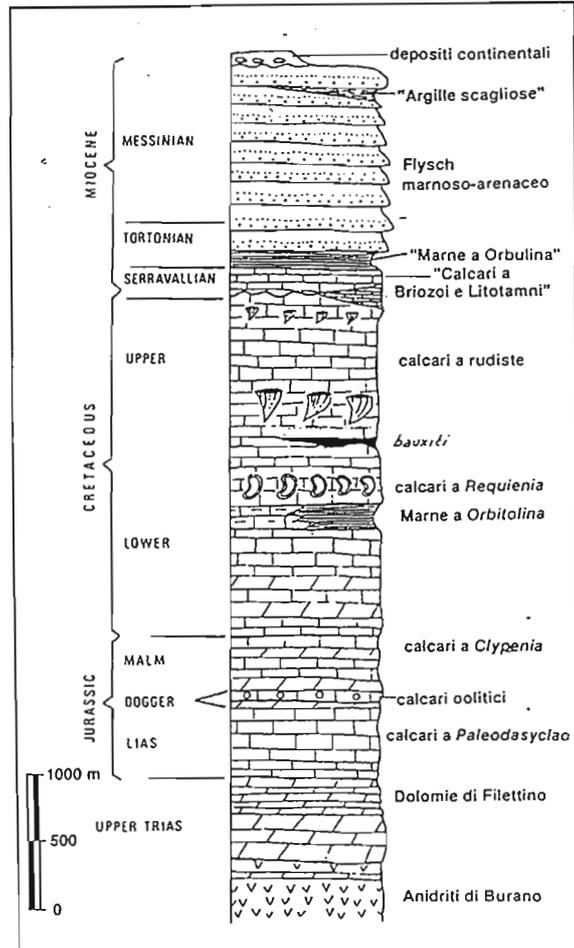


Fig. 2.3 - Successione di piattaforma carbonatica in *facies laziale-abruzzese* (da Parotto & Praturlon, 1975, modificato).

Ad una scala di maggiore dettaglio, ulteriori complicazioni strutturali vengono segnalate all'interno della catena, con l'identificazione di motivi legati a una tettonica trascorrente (Corrado *et alii*, 1990; Montone e Salvini, 1989; Parotto *et alii*, 1990), mentre lungo i sovrascorrimenti interni si rilevano accavallamenti complessi, che portano alla sovrapposizione di termini più giovani sui più antichi.

2.4. Inquadramento idrogeologico

La geometria dell'idrostruttura simbruino-ernica è definita da limiti di permeabilità laterali identificati sia dai depositi terrigeni silicoclastici altomiocenici sia fluvio-lacustri quaternari, lungo cui sono ubicate, a quote prossime a 320 metri, le principali sorgenti del sistema carsico considerato (Gruppo di Agosta).

Nell'alto Aniene la presenza di emergenze a quote prossime a 1000 metri si correla a differenti condizioni strutturali dell'acquifero carsico che, privo di limiti di permeabilità laterali, è sostenuto dal tetto del substrato dolomitico regionale. Il substrato triassico tra Vallepietra e Filettino raggiunge quote confrontabili con quelle delle sorgenti montane dell'Aniene. Il ruolo di soglia idraulica della sequenza dolomitica triassica, riconosciuto nell'alto Aniene, consente di estendere il limite basale dell'idrostruttura carsica sino all'alto Liri. In tale settore, come è noto, sono ubicate numerose emergenze di cui le più alte si trovano a quote prossime a 900 metri (S. Liri).

In un quadro idrogeologico esemplificato, possiamo ritenere che le condizioni ai limiti del settore montano dell'idrostruttura simbruina siano quelle proprie di una falda libera a potenziale variabile nel tempo e nello spazio. Le linee di flusso, da un imprecisato spartiacque sotterraneo, alimentano sia le sorgenti dell'alto Aniene che dell'alto Liri.

2.5. Periodo 1926-1995 (Analisi di bilancio medio annuo)

L'analisi di bilancio del bacino imbrifero del Fiume Aniene (216 Km²), sia su lungo periodo (1926-1995) che per l'anno idrologico 1994-1995, oltre a definire su basi quantitative la disponibilità media della risorsa naturalmente rinnovabile, ha permesso di migliorare le conoscenze sulla geometria e sulle condizioni ai limiti dell'idrostruttura.

2.5.1. Precipitazioni

I dati pluviometrici riferiti alla serie storica 1926-1995 (70 anni) si riferiscono ai pluviografi di Subiaco-S.Scolastica (511 m), Affile (684 m), Trevi nel Lazio (821 m), Vallepietra (825 m) e Filettino (1062 m), gestiti dal Servizio Idrografico di Stato (Sezione di Roma). In Tab. 2.1 vengono riportati i valori annui e annuo medio delle precipitazioni del periodo. Relativamente alla serie storica della stazione di "Santa Scolastica" viene proposta una elaborazione grafica dei dati annui, con il calcolo della media mobile di 5 anni consecutivi di precipitazione.

La rappresentazione che ne deriva viene messa a confronto con i valori della media mobile dei deflussi registrati a Subiaco (365 m) nello stesso periodo (Fig. 2.4). La relazione "precipitazioni - deflussi" consente di identificare i periodi umidi e aridi nella serie storica, evidenziandosi nei due parametri una marcata sincronia nella ciclicità degli eventi idrologici.

L'elaborazione dei dati di piovosità del periodo 1926-1995 ha lo scopo di giungere ad una valutazione della precipitazione rappresentativa della quota media del bacino, pari a 1140 m.

anno	S.SCOLASTICA	AFFILE (684m)		TREVI (821m)		VALLEPIETRA (825m)		FILETTINO (1062m)		QUOTA 1140m	
	511m (Pr)	DATI S.I.	DATI RIC.	DATI S.I.	DATI RIC.	DATI S.I.	DATI RIC.	DATI S.I.	DATI RIC.	DATI RIC.	Δ*
1926	1150	1202	1257	1280	1342	1265	1345	1298	1492	1540	24%
1927	1168	1203	1275	1387	1360	1427	1363	1435	1510	1558	18%
1928	1229	1238	1336	1233	1421	1440	1424	1328	1571	1619	25%
1929	1153	1005	1260	1188	1345	1314	1348	1170	1495	1543	32%
1930	1269	1239	1376	1290	1461	1505	1464	1328	1611	1659	25%
1931	1015	1150	1122	1007	1207	1638	1210	1407	1357	1405	13%
1932	932	982	1039	721	1124	1101	1127	1139	1274	1322	36%
1933	1473	1381	1580	1725	1665	1783	1668	1919	1815	1863	12%
1934	1128	1290	1235	885	1320	1302	1323	1450	1470	1518	25%
1935	1173	1303	1280	(-)	1365	1565	1368	1541	1515	1563	12%
1936	1212	1416	1319	(-)	1404	1499	1407	1418	1554	1603	16%
1937	1703	1787	1810	(-)	1895	1999	1898	1989	2045	2093	12%
1938	1122	1217	1229	(-)	1314	1324	1317	1342	1464	1512	21%
1939	1257	1394	1364	(-)	1449	1262	1452	1357	1599	1647	25%
1940	1222	(-)	1329	(-)	1414	1448	1417	1403	1564	1612	19%
1941	1614	1640	1721	(-)	1806	1927	1809	1816	1956	2004	15%
1942	994	1063	1101	(-)	1186	(-)	1189	1167	1336	1384	29%
1943	1102	1212	1209	(-)	1294	(-)	1297	1125	1444	1492	30%
1944	1353	(-)	1380	(-)	1465	(-)	1468	1144	1615	1663	33%
1945	820	(-)	927	(-)	1012	(-)	1015	908	1162	1210	40%
1946	1126	1106	1233	(-)	1318	(-)	1321	959	1468	1516	43%
1947	1381	1443	1488	(-)	1573	(-)	1576	1479	1723	1771	23%
1948	1041	1016	1148	(-)	1233	(-)	1236	1149	1383	1431	34%
1949	1015	1011	1122	(-)	1207	(-)	1210	1028	1357	1405	38%
1950	1269	1269	1376	(-)	1461	(-)	1464	1233	1611	1659	32%
1951	1409	1468	1516	(-)	1601	(-)	1604	1490	1751	1799	24%
1952	1268	1521	1375	(-)	1460	(-)	1463	1659	1610	1658	12%
1953	951	(-)	1058	(-)	1143	923	1146	1000	1293	1341	40%
1954	912	995	1019	(-)	1104	979	1107	1019	1254	1302	33%
1955	1242	1207	1349	(-)	1434	1450	1437	1484	1584	1632	21%
1956	1183	1442	1290	(-)	1375	1284	1378	1067	1525	1573	26%
1957	929	1090	1036	(-)	1121	1259	1124	1103	1271	1319	20%
1958	1319	1484	1426	(-)	1511	1863	1514	1384	1661	1709	13%
1959	1406	1655	1513	(-)	1598	2270	1601	1880	1748	1796	0%
1960	1790	2100	1897	(-)	1982	2376	1985	1978	2132	2180	6%
1961	1145	1188	1252	(-)	1337	1492	1340	1226	1487	1535	22%
1962	1343	1565	1450	(-)	1535	1661	1538	1802	1685	1733	9%
1963	1705	1777	1812	(-)	1897	2126	1900	1732	2047	2095	14%
1964	1329	1638	1436	(-)	1521	1843	1524	1793	1671	1719	4%
1965	1136	1364	1243	(-)	1328	1781	1331	1668	1478	1526	3%
1966	1358	1655	1465	(-)	1550	1999	1553	1813	1700	1748	2%
1967	842	1008	949	(-)	1034	1194	1037	1168	1184	1269	21%
1968	971	1232	1078	(-)	1163	(-)	1166	1277	1313	1361	17%
1969	1302	1741	1409	(-)	1494	2118	1497	1892	1644	1692	-4%
1970	1062	1304	1169	(-)	1254	(-)	1257	1418	1404	1452	15%
1971	1204	1558	1311	(-)	1396	1893	1399	1482	1546	1594	4%
1972	1383	1594	1490	(-)	1575	1795	1578	1552	1725	1773	12%
1973	971	1120	1078	(-)	1163	(-)	1166	1129	1313	1361	27%
1974	888	1344	995	(-)	1080	(-)	1083	(-)	1230	1278	15%
1975	1136	1256	1243	(-)	1328	(-)	1331	(-)	1478	1526	28%
1976	1696	1896	1803	(-)	1888	(-)	1891	(-)	2038	2086	16%
1977	1144	1216	1251	(-)	1336	(-)	1339	(-)	1486	1534	30%
1978	1857	2083	1964	(-)	2049	(-)	2052	(-)	2199	2247	14%
1979	1719	2080	1826	(-)	1911	(-)	1914	(-)	2061	2109	11%
1980	1248	1372	1355	(-)	1440	(-)	1443	(-)	1590	1638	25%
1981	1163	1398	1270	(-)	1355	(-)	1358	(-)	1505	1553	21%
1982	1087	1230	1194	(-)	1279	(-)	1282	(-)	1429	1477	27%
1983	1045	1185	1152	(-)	1237	(-)	1240	(-)	1387	1435	29%
1984	1491	1654	1598	(-)	1683	(-)	1686	(-)	1833	1881	20%
1985	957	1152	1064	(-)	1149	(-)	1152	(-)	1299	1347	28%
1986	1495	1573	1602	(-)	1687	(-)	1690	(-)	1837	1885	23%
1987	1136	1319	1243	(-)	1328	(-)	1331	(-)	1478	1526	24%
1988	880	1195	987	(-)	1072	1042	1075	(-)	1222	1270	22%
1989	1031	1273	1138	(-)	1223	1340	1226	(-)	1373	1421	17%
1990	1185	1372	1292	(-)	1377	1194	1380	(-)	1527	1575	26%
1991	1362	1590	1469	(-)	1554	(-)	1557	(-)	1704	1752	19%
1992	1170	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	1560	33%
1993	1073	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	1463	36%
1994	993	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	1896	1335	1383	-4%
1995	1102	1340	1209	(-)	(-)	1328	1297	1734	1444	1492	9%
MEDIA	1213	1378	1325	1191	1412	1553	1413	1424	1557	1603	19%

Tab. 2.1 - Ricostruzione delle precipitazioni annue e annua media secondo il gradiente pluviometrico di 62 mm/100 m. (DATI RIC.: valori ricostruiti della precipitazione annua in base al grad.pluv.medio di 62 mm/100 m. DATI S.I.: valori della precipitazione annua desunti dagli Annali del Servizio Idrografico. Δ*: Scarto dei valori delle precipitazioni annue riferite alla quota media del bacino e al valore medio dei dati rilevati dal S.I.)

La scarsità di stazioni ubicate a quote elevate lasciano, tuttavia, margini di incertezza nella attendibilità della precipitazione riferita alle condizioni climatiche medie dell'area. Il metodo seguito si basa sul calcolo del gradiente pluviometrico medio (Viparelli, 1961; Frosini, 1961; Mennella, 1967; 1973), riferito alle registrazioni delle stazioni considerate più rappresentative tra quelle esistenti nel territorio.

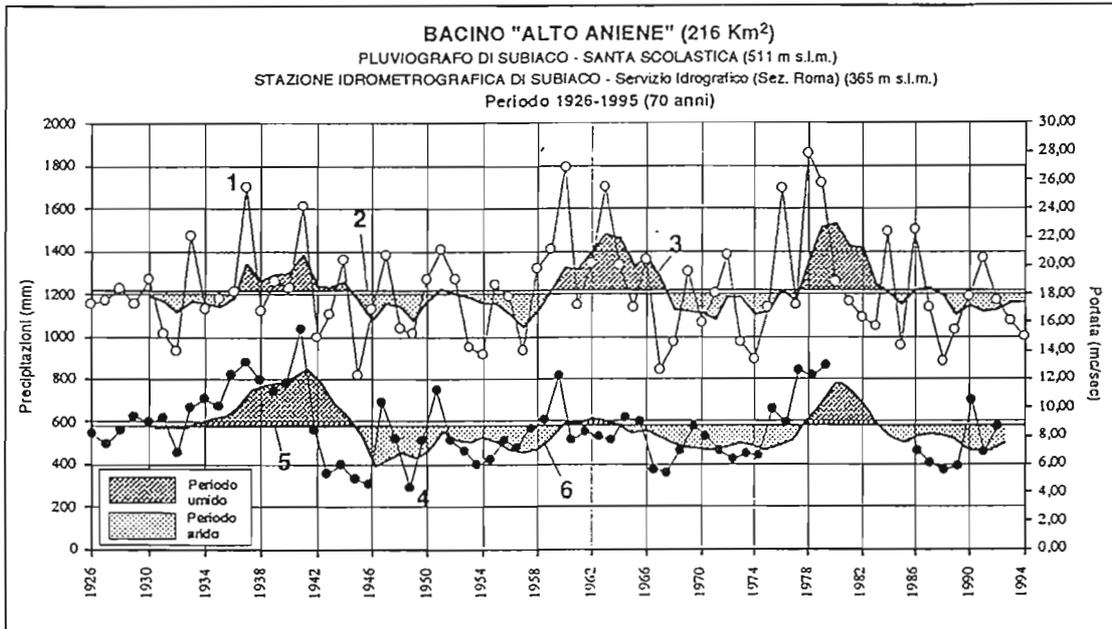


Fig. 2.4 - Serie storica (1926-1995) delle precipitazioni e dei deflussi alla stazione pluviometrica di Santa Scolastica (511 m) ed idrometrografica di Subiaco (365 m). Legenda: 1) precipitazione annua; 2) precipitazione annua media; 3) media mobile di un quinquennio di precipitazioni; 4) deflusso annuo (media delle portate giornaliere), in mc/s; 5) portata annua media; 6) media mobile di 5 anni della portata annua.

I dati di base per il calcolo del gradiente pluviometrico nel bacino dell'Alto Aniene fanno riferimento alle serie storiche registrate agli osservatori climatici di Subiaco "Santa Scolastica" (511 m) e di Filettino (1062 m) (Fig. 2.5), limitatamente al periodo rappresentativo 1965-1973 (Decennio Idrologico Internazionale). Il gradiente pluviometrico medio risulta di 62 mm/100 m.

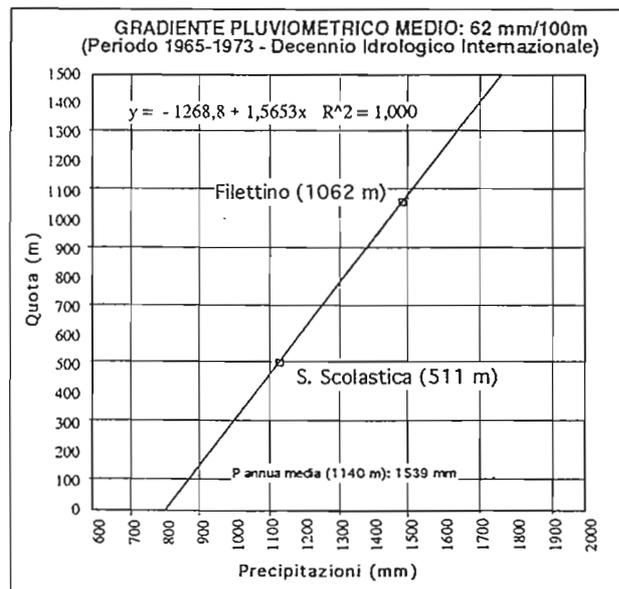


Fig. 2.5 - Diagramma di correlazione 'pivosità-altitudine', per il calcolo del gradiente pluviometrico e della precipitazione alla quota media del bacino (periodo 1965-1973).

La precipitazione annua media riferita alla quota media del bacino (1140 m), per il periodo 1926-1995 è di **1603 mm** (Tab. 2.1).

2.5.2. Evapotraspirazione reale

Sebbene l'alto Aniene per la sua estensione e per le caratteristiche morfologiche presenti sensibili differenze nei principali parametri ambientali riferiti ai diversi settori del bacino, i metodi di valutazione dell'evapotraspirazione reale attendibili sono quelli proposti da Turc (1955) e da Thornthwaite - Mather (1957).

2.5.2.1. Metodo di Thornthwaite - Mather

La relazione, di tipo esponenziale, tra la quantità di evapotraspirazione potenziale (cm di lama d'acqua) e la temperatura media mensile (°C) del territorio in studio è la seguente:

$$Ep = 1,6k\left(\frac{10T}{I}\right)^a \quad (1)$$

in cui:

Ep = evapotraspirazione potenziale media mensile (in cm)

k = coefficiente funzione della latitudine; dipende dalle ore mensili medie di soleggiamento astronomico (si ricava da apposite tabelle)

T = temperatura media mensile (°C)

I = indice annuale del calore, pari alla sommatoria degli indici mensili del calore;

$$I = \sum_i (i = 0,9T^{1,514})$$

a = coefficiente funzione dell'indice annuale del calore, pari a:

$$675 \times 10^{-9} \times I^3 - 771 \times 10^{-7} \times I^2 + 1792 \times 10^{-5} + 0,49239$$

Il valore di evapotraspirazione reale (Er) per il periodo 1926-1995 desunto con l'applicazione del metodo di Thornthwaite - Mather (1957) a partire dal calcolo della evapotraspirazione potenziale annua media (703 mm/a) e nell'ipotesi di una capacità di campo di 100 mm, risulta di 612 mm/a. Tale dato è relativo alla quota della stazione pluviografica di Santa Scolastica (511 m), alla quale si riferiscono i dati di base mensili medi utilizzati per il calcolo di Er (temperatura annua media pari a 12,53 °C).

2.5.2.2. Metodo di Turc

La formula proposta da Turc, come è noto, si basa sulla relazione esistente tra la precipitazione annua media e la temperatura media dell'aria secondo l'espressione:

$$Er = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \left(\frac{P}{T}\right)}} \quad (2)$$

in cui:

E_r = evapotraspirazione reale annua (mm)

P = altezza annua di pioggia (mm)

L = parametro funzione della temperatura annuale media ($^{\circ}\text{C}$) pari a: $300+25T+0,05T^3$.

Il valore di E_r calcolato con la formula di Turc e riferito alla quota media del bacino imbrifero (1140 m) risulta di **567 mm/a**. Il valore di temperatura dell'aria utilizzato nel calcolo deriva dalla correlazione con l'altitudine dei valori di temperatura annua media delle stazioni di S. Scolastica (511 m, $12,4^{\circ}\text{C}$, periodo 1961-1972), Sorgenti Carpinetto (930 m, $10,9^{\circ}\text{C}$, periodo 1961-1966) e Filettino (1062 m, $10,6^{\circ}\text{C}$, periodo 1965-1972). Dal gradiente termico calcolato ($0,4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$) si desume la temperatura annua media di $10,1^{\circ}\text{C}$ riferita alla quota di 1140 m (Fig. 2.6).

Il valore di E_r calcolato con la formula di Turc per la quota di 511 m (quota del pluviografo di Santa Scolastica), risulta di 622 mm, confrontabile con quello ricavato applicando il metodo di Thornthwaite - Mather, pari a 612 mm e imponendo una capacità di campo di 100 mm.

Nell'analisi dell'equazione di bilancio si farà riferimento al valore di E_r calcolato con l'espressione di Turc, in quanto ritenuto maggiormente rappresentativo delle condizioni climatiche medie dell'area in esame.

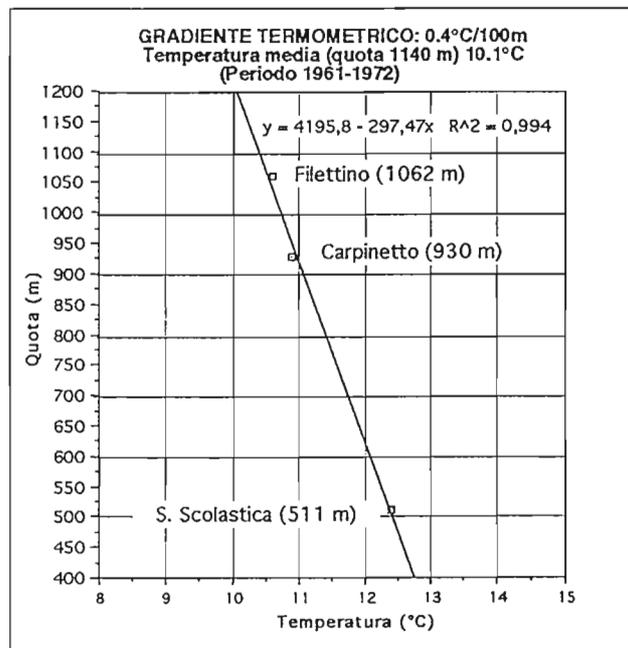


Fig. 2.6 - Diagramma di correlazione 'temperatura-altitudine', per il calcolo del gradiente termometrico medio e del valore di temperatura dell'aria alla quota media del bacino (periodo 1961-1973).

2.5.3. Precipitazione efficace (P_e)

Dall'espressione di bilancio (periodo 1926-1995) riferita ai soli dati climatici (precipitazioni e temperature dell'aria) si ricava il valore della precipitazione efficace (P_e) pari a **1036 mm/a** (65% della precipitazione), corrispondente ad una alimentazione del bacino idrologico (216 Km^2) di $224 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$.

2.5.4. Deflusso totale (Dt)

Alla sezione di uscita dal bacino imbrifero dell'alto Aniene (Subiaco: quota di 365 m) è ubicata la stazione di monitoraggio dei livelli idrometrici gestita dal Servizio Idrografico di Stato, in funzione dal 1926.

La portata annua media del periodo 1926-1995 (Tab. 2.2) è di 8,01 m³/sec, corrispondente al volume di 252,5 x 10⁶ m³/a e all'altezza della lama d'acqua equivalente di 1169 mm/a (Dt).

Dall'analisi degli idrogrammi giornalieri (1926-1995) basata sul metodo di scomposizione grafica, il deflusso totale (Dt) risulta costituito da aliquote di ruscellamento (R) e flusso di base (Fb) rispettivamente di 55 mm/a (4% Dt) e di 1115 mm/a (96% Dt).

anno	P (1140 m)		Deflusso totale			anno	P (1140 m)		Deflusso totale		
	(P) mm	(Dt) mm	10 ⁶ mc	mc/sec	%(P)		(P) mm	(Dt) mm	10 ⁶ mc	mc/sec	%(P)
1926	1540	1116	241,06	7,64	72	1981	1535	1039	224,42	7,12	68
1927	1558	1010	218,16	6,92	64	1982	1733	1119	241,70	7,66	64
1928	1619	1147	247,75	7,86	71	1983	2095				
1929	1543	1266	273,46	8,67	82	1984	1719	1046	225,94	7,16	61
1930	1659	1218	263,09	8,34	73	1985	1526	1262	272,59	8,64	83
1931	1405	1254	270,86	8,59	89	1986	1748	1218	263,09	8,34	70
1932	1322	932	201,31	6,38	70	1987	1269	755	163,08	5,17	59
1933	1863	1350	291,60	9,25	72	1988	1361	722	155,95	4,95	53
1934	1518	1443	311,69	9,88	95	1989	1692				
1935	1563	1373	296,57	9,40	88	1990	1452	1176	254,02	8,05	81
1936	1603	1671	360,94	11,45	104	1991	1594				
1937	2093	1791	386,86	12,27	85	1992	1773				
1938	1512	1626	351,22	11,14	107	1993	1361	864	186,62	5,92	63
1939	1647	1500	324,00	10,27	91	1994	1278	912	196,99	6,25	71
1940	1612	1593	344,09	10,91	99	1995	1526	886	191,38	6,07	58
1941	2004	2098	453,17	14,37	105	1996	2086	1339	289,22	9,17	64
1942	1384	1144	247,10	7,84	83	1997	1534	1207	260,71	8,27	79
1943	1492	718	155,09	4,92	48	1998	2247	1706	368,50	11,88	76
1944	1663					1999	2109	1652	356,83	11,32	78
1945	1210					2000	1638	1764	381,02	12,08	108
1946	1516	633	136,73	4,34	42	2001	1553				
1947	1771	1415	305,84	9,69	80	2002	1477				
1948	1431	1055	227,88	7,23	74	2003	1435				
1949	1405	593	128,09	4,06	42	2004	1881				
1950	1659	1038	224,21	7,11	62	2005	1347				
1951	1799	1523	328,97	10,43	85	2006	1885				
1952	1658	1039	224,42	7,12	63	2007	1526	944	203,90	6,47	62
1953	1341	940	203,04	6,44	70	2008	1270	832	179,71	5,70	66
1954	1302	801	173,02	5,49	61	2009	1421	753	162,65	5,16	53
1955	1632	858	185,33	5,88	52	2010	1575	790	170,64	5,41	50
1956	1573	1038	224,21	7,11	66	2011	1752	1423	307,37	9,75	81
1957	1319	973	210,17	6,66	74	2012	1580	931	201,10	6,38	60
1958	1709	1154	249,26	7,90	67	2013	1463	1172	253,15	8,03	80
1959	1796	1235	266,76	8,46	69	2014	1383	950	205,20	6,51	69
1960	2180	1656	357,70	11,34	76	2015	1492	1150	248,40	7,88	83
						media	1603	1169	252,54	8,01	73

Tab. 2.2 - Precipitazioni e deflussi riferiti alla superficie di dominio del bacino imbrifero (216 Km²) I valori delle portate sono riferiti alla sezione di misura (Serv. Idrogr.) di Subiaco (365 m)

2.5.5. Considerazioni sui dati di bilancio

Al valore della precipitazione efficace (Pe) di 1036 mm/a (pari a 224 x 10⁶ m³/a sulla superficie di 216 Km²) corrisponde il deflusso totale (Dt) di 252,5 x 10⁶ m³/a (equivalente, sulla superficie di bacino versante, a 1169 mm/a; Tab. 2.3). Dal confronto dei parametri si evidenzia una diversa valutazione della superficie del bacino idrogeologico rispetto a quello imbrifero.

anno	P (mm)	Dt (mm)	Flusso di base			Ruscellamento		Evapotr.		Infiltrazione	
			(Fb) mm	%(P)	%(Dt)	(R) mm	%(P)	(Er) mm	%(P)	(Ie) mm	%(P)
1926	1540	1116	1083	70	97	33	2	566	37	941	61
1927	1558	1010	990	64	98	20	1	567	36	971	62
1928	1619	1147	1101	68	96	46	3	569	35	1004	62
1929	1543	1266	1228	80	97	38	2	566	37	939	61
1930	1659	1218	1157	70	95	61	4	571	34	1027	62
1931	1405	1254	1229	87	98	25	2	559	40	821	58
1932	1322	932	904	68	97	28	2	554	42	740	56
1933	1863	1350	1269	68	94	81	4	577	31	1205	65
1934	1518	1443	1400	92	97	43	3	565	37	910	60
1935	1563	1373	1318	84	96	55	4	567	36	941	60
1936	1603	1671	1587	99	95	84	5	569	35	950	59
1937	2093	1791	1648	79	92	143	7	582	28	1368	65
1938	1512	1626	1545	102	95	81	5	565	37	866	57
1939	1647	1500	1425	87	95	75	5	570	35	1002	61
1940	1612	1593	1481	92	93	112	7	569	35	931	58
1941	2004	2098	1972	98	94	126	6	581	29	1297	65
1942	1384	1144	1121	81	98	23	2	558	40	803	58
1943	1492	718	675	45	94	43	3	564	38	885	59
1944	1663							571	34		
1945	1210							548	45		
1946	1516	633	620	41	98	13	1	565	37	938	62
1947	1771	1415	1344	76	95	71	4	575	32	1125	64
1948	1431	1055	1013	71	96	42	3	561	39	828	58
1949	1405	593	563	40	95	30	2	559	40	816	58
1950	1659	1038	976	59	94	62	4	571	34	1026	62
1951	1799	1523	1493	83	98	30	2	575	32	1194	66
1952	1658	1039	1008	61	97	31	2	571	34	1056	64
1953	1341	940	893	67	95	47	4	555	41	739	55
1954	1302	801	769	59	96	32	2	563	42	717	55
1955	1632	858	815	50	95	43	3	570	35	1019	62
1956	1573	1038	1017	65	98	21	1	567	36	985	63
1957	1319	973	895	68	92	78	6	564	42	687	52
1958	1709	1154	1050	61	91	104	6	573	32	1032	60
1959	1796	1235	1186	66	96	49	3	575	32	1172	65
1960	2180	1656	1557	71	94	99	5	584	27	1497	69
1961	1535	1039	987	64	95	52	3	566	37	917	60
1962	1733	1119	1097	63	98	22	1	573	33	1138	66
1963	2095							583	28		
1964	1719	1046	983	57	94	63	4	573	33	1083	63
1965	1526	1262	1212	79	96	50	3	565	37	911	60
1966	1748	1218	1194	68	98	24	1	574	33	1150	66
1967	1269	755	732	58	97	23	2	550	43	696	55
1968	1361	722	693	51	96	29	2	557	41	775	57
1969	1692							572	34		
1970	1452	1176	1105	76	94	71	5	562	39	819	56
1971	1594							568	36		
1972	1773							575	32		
1973	1361	864	847	62	98	17	1	557	41	787	58
1974	1278	912	866	68	95	46	4	551	43	681	53
1975	1526	886	851	56	96	35	2	565	37	926	61
1976	2086	1339	1285	62	96	54	3	582	28	1450	70
1977	1534	1207	1123	73	93	84	8	566	37	884	58
1978	2247	1706	1587	71	93	119	5	585	26	1543	69
1979	2109	1652	1520	72	92	132	6	583	28	1394	66
1980	1638	1764	1605	98	91	159	10	570	35	909	56
1981	1553							567	36		
1982	1477							563	38		
1983	1435							561	39		
1984	1881							578	31		
1985	1347							556	41		
1986	1885							578	31		
1987	1526	944	925	61	98	19	1	565	37	942	62
1988	1270	832	790	62	95	42	3	551	43	678	53
1989	1421	753	730	51	97	23	2	560	39	838	59
1990	1575	790	758	48	96	32	2	568	36	976	62
1991	1752	1423	1380	79	97	43	2	574	33	1135	65
1992	1560	931	875	56	94	58	4	567	36	937	60
1993	1463	1172	1149	79	98	23	2	562	38	877	60
1994	1383	950	922	67	97	29	2	558	40	796	58
1995	1492	1150	1104	74	96	46	3	564	38	882	59
media	1603	1169	1115	69	96	55	3	567	36	975	61

Tab. 2.3 - Confronto tra i valori annui riferiti ai termini che rientrano nell'espressione di Bilancio Idrologico ($P = Ie + R + Er$) Le precipitazioni sono riferite alla stazione di Subiaco Santa scolastica (511 m), mentre i deflussi all'idrometrografo di Subiaco (365 m), entrambi gestiti dal Servizio Idrografico di Stato (sez. di Roma)

Qualora risulti rappresentativo delle condizioni climatiche del bacino il valore di precipitazione annua media di 1603 mm alla quota media di 1140 m e qualora trovi conferma sperimentale il valore di Precipitazione efficace di 1036 mm/a, l'area di alimentazione riferita al volume d'acqua mediamente defluito (Dt) a Subiaco risulterebbe di 244 Km², circa 30 Km² più estesa del dominio idrologico (216 Km²). La superficie delle aree carsiche endoreiche ubicate ai margini del sistema (Campo dell'Osso, Campo Minio, Campo Staffi, Campo Catino, Altipiani di Arcinazzo p.p.) sarebbe confrontabile in valore con il deficit di area di alimentazione calcolato. Definire quale sia l'effettiva geometria dell'area di alimentazione della falda che sostiene la portata dell'Aniene, non è ancora possibile alla luce delle attuali conoscenze e dei dati acquisiti. Allo scopo la ricerca dovrebbe essere indirizzata anche verso alcuni settori extrabacinali su cui condurre indagini specifiche idrologiche, idrogeochimiche ed isotopiche. In questo contesto parte del bacino imbrifero del Fioio, a nord dell'area in esame, e i campi carsici Ceraso e della Pietra, potrebbero costituire area di alimentazione della falda in rete che sostiene il flusso dell'Aniene. Sulla base di indagini dirette eseguite con traccianti colorati (Terragni, 1991) viene riconosciuto il collegamento idraulico tra l'areale carsico di Campo Catino e le sorgenti La Foce e Ceraso lungo l'asta dell'Aniene.

2.6. Analisi di bilancio dell'anno idrologico 1994-1995

Il ciclo idrologico considerato è compreso tra due periodi di magra successivi, dal mese di Dicembre 1994 a Novembre 1995. Dall'analisi degli idrogrammi annui della serie storica riferita alla stazione idrometrica di Subiaco (1926-1995), si desume che la magra più pronunciata dell'anno medio si registra nel periodo Settembre-Ottobre, con pronunciato esaurimento delle risorse dopo la ricarica autunno-invernale (periodo di piena) e primaverile spesso associata allo scioglimento delle nevi. I periodi di magra che si protraggono fino ai mesi di Novembre e Dicembre costituiscono pertanto casi estremi a cui si associano generalmente le minime portate, in assoluto, dell'Aniene.

2.6.1. Precipitazioni (P)

Le stazioni di registrazione dei dati climatici cui si è fatto riferimento sono quelle di Subiaco "Santa Scolastica" (511 m), Affile (694 m), Vallepietra (825 m) e Filettino (1062) gestite dal Servizio Idrografico "Sezione di Roma". In Tabella 2.4 vengono riportati i valori pluviometrici e termometrici questi ultimi riferiti a "Santa Scolastica", Vallepietra e Filettino. Dal gradiente ← pluviometrico del periodo pari a 73 mm/100 m, si ricava il valore di precipitazione annua di **1437 mm**, riferita alla quota media del bacino (1140 m), corrispondente all'afflusso annuo di $310 \times 10^6 \text{ m}^3$.

	Precipitazioni (mm)				Temperature (°C)			Deflussi (mc)	
	Santa Scolastica	Affile	Vallepietra	Filetino	Santa Scolastica	Vallepietra	Filetino	Subiaco (365 m)	
	(511 m)	(694 m)	(825 m)	(1062 m)	(511 m)	(825 m)	(1062 m)	Q (mc/s)	(106 mc)
Dicembre	71	80	78	110		4,9	4,6	3,63	9,72
Gennaio	66	74	115	189	4,2	1,4	1,2	5,37	14,39
Febbraio	89	114	134	125	7,6	5,8	5	5,69	13,77
Marzo	118	139	140	181	6,4	4,3	3,2	7,49	20,06
Aprile	114	142	80	154	10,3	8,2	7,2	9,59	24,86
Maggio	139	138	127	138	14,6	12,6	11,2	14,11	37,8
Giugno	25	20	18	19	17,2	14,9	13,4	9,29	24,08
Luglio	92	64	82	105	22,6	20,6	18,3	7,44	19,94
Agosto	131	116	136	122	19,8	17,6	15,6	7,49	20,07
Settembre	120	179	130	228	16,2	13,7	11,8	7,7	19,96
Ottobre	3	6	2	1	12,9	11,3	11,2	6,48	13,51
Novembre	47	55	61	63	8,1	5,5	5,7	5,21	23,2
Anno	1015	1127	1103	1435	12,72	10,07	9,03	7,46	235,60

Tab. 2.4 - Precipitazioni, temperatura dell'aria e portate relative al ciclo idrologico 1994-1995. Dati riferiti alle stazioni gestite dal Servizio Idrografico di Stato (Sez. di Roma)

2.6.2. Evapotraspirazione reale (Er)

La formula di Turc (1955) consente di calcolare un valore di **515 mm** (36 % di P), dai dati di temperatura e precipitazione riferiti alla quota media del bacino. Nell'analisi del bilancio, tale valore viene considerato maggiormente rappresentativo rispetto a quello desunto dall'espressione di Thornthwaite - Mather (1957), pari a 583 mm, poiché riferito della quota media del bacino (1140 m).

2.6.3. Precipitazione efficace (Pe)

Dai valori di P e Er si ricava Pe pari a **922 mm**, corrispondente al 64 % della precipitazione annua.

2.6.4. Deflusso totale (Dt)

Sulla base delle registrazioni idrometriche alla stazione di Subiaco (365 m; Fig. 2.7) per il periodo considerato, viene calcolato un deflusso annuo dell'alto Aniene di $241 \times 10^6 \text{ m}^3$ (portata media di $7,5 \text{ m}^3/\text{s}$), pari ad una altezza equivalente di 1091 mm. Dalla scomposizione dell'idrogramma (Dicembre 1994 - Novembre 1995) basata sull'analisi degli eventi di flusso critico occorsi nel periodo esaminato, deriva una valutazione quantitativa delle componenti della portata totale. Così, le aliquote riferibili al ruscellamento (R) e al flusso di base (Fb) sono rispettivamente di $0,27 \times 10^6 \text{ m}^3$ (0,1% Dt) pari a 1,2 mm e di $241 \times 10^6 \text{ m}^3$ (99,9% Dt) equivalenti a circa 1090 mm. In Tabella 2.5 vengono riassunti i dati di bilancio riferiti ai periodi annuo medio (1926-1995) e 1994-1995.

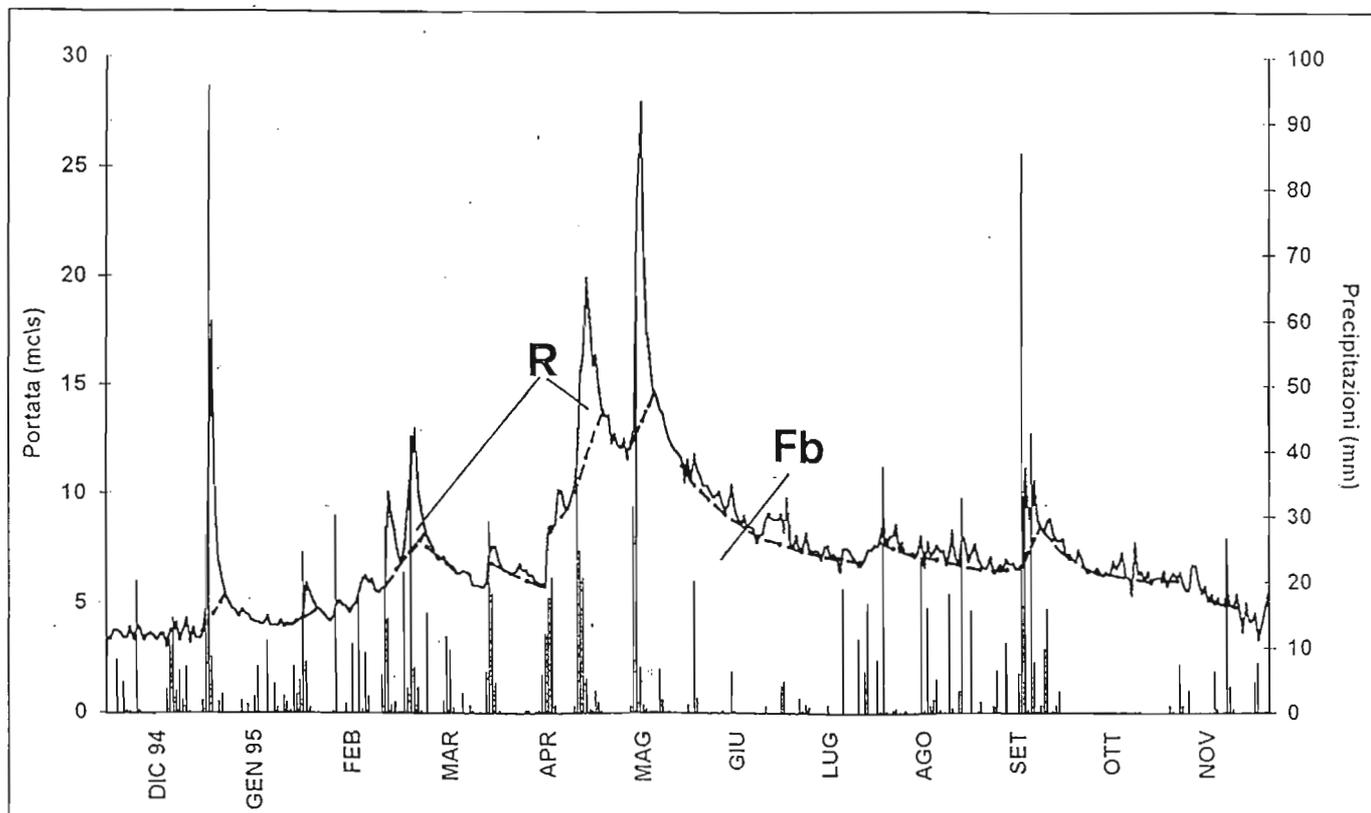


Fig. 2.7 - Idrogramma del Fiume Aniene a Subiaco (365 m) nel ciclo idrologico 1994-1996 (Servizio Idrografico di Stato, sezione di Roma, dati inediti)

2.6.5. Considerazioni sui dati di bilancio

Al deflusso totale annuo (Dt) riferito alla stazione idrometrica di Subiaco ($241 \times 10^6 \text{ m}^3$) debbono essere sommate le perdite dovute alla derivazione di sorgenti e alla captazione di acque sotterranee, che alimentano la rete di acquedotti verso aree extrabacinali. Poiché tali perdite per il periodo considerato, sono complessivamente di $26 \times 10^6 \text{ m}^3$ (dati del Consorzio Acquedotti del Simbrivio), il deflusso totale, a Subiaco, sarebbe di $262 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$.

	Periodo 1926-1995			Perido 1994-1995		
	(mm)	(10^6 mc/a)	(% P)	(mm)	(10^6 mc/a)	(% P)
Precipitazioni (P)	1603	346	100	1437	310	100
Deflusso totale (Dt)	1169	253	73	1091	236	76
Flusso di base (Fb)	1115	241	70	1090	235	76
Ruscellamento (R)	55	12	3	1,2	0,27	0
Evapotrasp. reale (Er)	567	122	35	515	111	36
Precipitazione efficace (Pe)	1036	224	65	922	199	64
Infiltrazione efficace (Ie)	981	211	61	921	199	64
Perdite (U)				123	26	84
Dt + U				1213	262	9

Tab. 2.5 - Quadro sinottico dei risultati di bilancio idrologico.

Dal confronto tra il volume corrispondente alla sommatoria deflusso totale + perdite (262×10^6 m³) e il valore della precipitazione efficace (922 mm) si calcola la superficie di alimentazione equivalente pari a 284 Km², più estesa dell'area del bacino imbrifero di circa 68 Km².

Sulla base del bilancio riferito all'anno idrologico del periodo 1994-1995, verrebbe sostanzialmente confermato quanto emerge dal bilancio annuo medio (70 anni di osservazioni). Dalle analisi riferite ai cicli annuali del periodo 1921-1996 si desumono significative variazioni della geometria dell'acquifero sebbene la superficie equivalente del "saturato" che deriva dai dati di bilancio, sia generalmente maggiore di quella del bacino imbrifero. Il campo di oscillazione della superficie piezometrica della falda basale viene correlato all'effetto della ciclicità dei periodi aridi e umidi, con conseguente variazione delle riserve immagazzinate nel serbatoio carbonatico regionale (Fig. 2.4). La valutazione quantitativa degli afflussi resta, tuttavia, uno dei maggiori problemi da cui dipende il significato dei dati di bilancio, tenuto conto che la quota media degli osservatori delle precipitazioni è di 781 m mentre la quota media del bacino è di 1140 metri.

Analisi quantitativa del regime dell'alto Aniene

3.1. Introduzione

L'analisi dettagliata del regime di flusso dell'alto Aniene ha permesso di migliorare le conoscenze sulla dinamica di circolazione sotterranea che si sviluppa nel sistema carsico simbruino-ernico.

Nel corso del 1995 sono state condotte, con periodicità mensile, misure di portata seriate lungo il reticolo idrografico dell'alto Aniene e dei suoi principali tributari (Torrente Simbrivio e Fosso Campo; Fig. 3.1). Sebbene in generale si rilevino incrementi nei valori di portata crescenti verso valle dalle sorgenti montane dell'area di Filettino (~ 1100 m), alcuni settori d'alveo risultano caratterizzati da decrementi di flusso. Queste perdite, variabili con il regime delle precipitazioni, sono particolarmente rilevanti nel periodo di esaurimento estivo-autunnale.

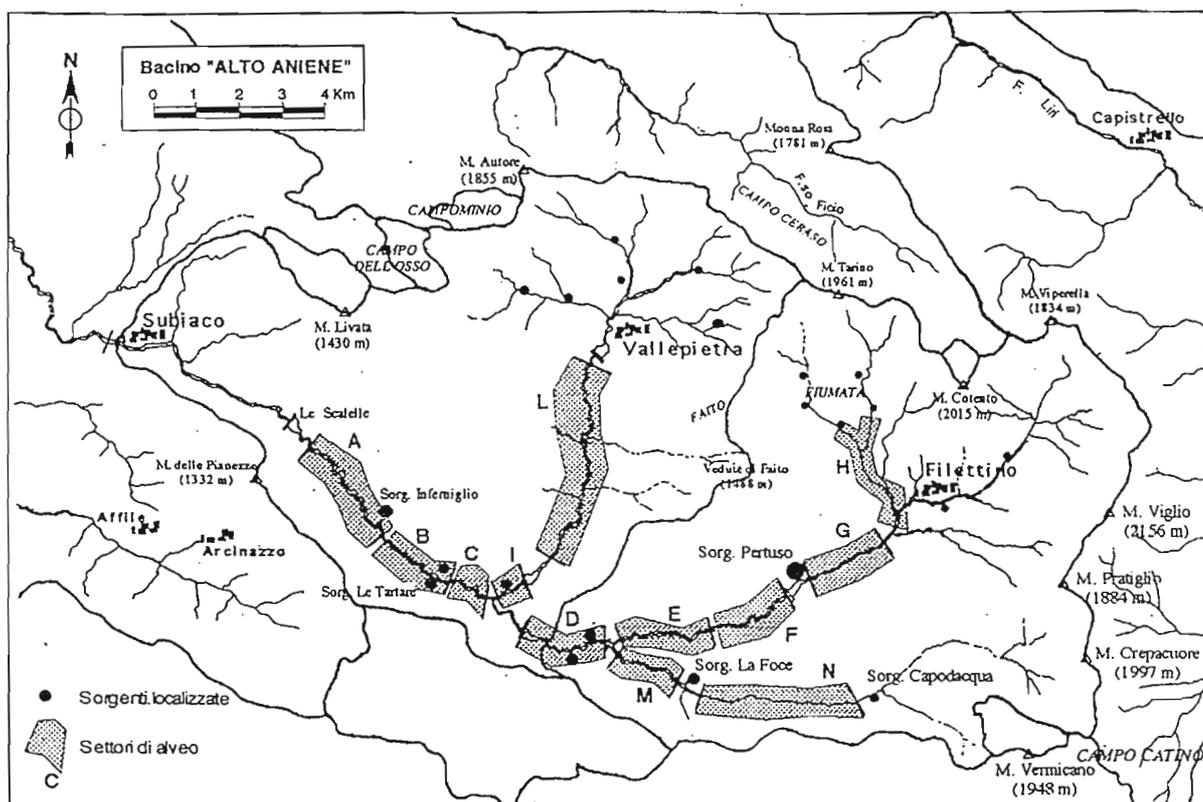


Fig. 3.1 - Schema rappresentativo del bacino idrografico dell'alto Aniene. Ubicazione dei settori di alveo per la determinazione del regime di flusso.

I settori di alveo "perdenti" hanno manifestato tale comportamento idrodinamico nel corso di più cicli idrologici come risulta dai dati sperimentali acquisiti a partire dal 1991 (Percopo, 1991; Travia, 1992; Turco, 1993; Lodi, 1994; Pefumi, 1995).

Le variazioni di flusso osservate si correlano alla dinamica dei rapporti di scambio tra la falda di base che satura l'idrostruttura carsica simbruina ed il reticolo idrografico dell'Aniene. Rilevabili attraverso un monitoraggio continuo nello spazio e nel tempo, dalle variazioni idrodinamiche derivano informazioni sulle modalità di circolazione sotterranea delle acque nella roccia serbatoio.

Questa indagine consente di definire, inoltre, la natura degli apporti idrici nel reticolo di flusso perenne, discriminando quelli dovuti a contributi puntuali attraverso le sorgenti localizzate da quelli diffusi e identificati come "sorgenti lineari in alveo" (Boni *et al.*, 1986; Boni *et al.*, 1988)

3.2. Acquisizione dati

L'analisi del regime dell'alto Aniene (Fig. 3.1) si riferisce al monitoraggio idrologico del reticolo idrografico perenne, con periodicità mensile a partire da Gennaio 1995. Alle misure di portata eseguite in 22 sezioni fluviali, sono state associate determinazioni delle principali caratteristiche chimico-fisiche delle acque (Temperatura, pH, Conducibilità elettrica, $[HCO_3^-]$, torbidità), con lo scopo di caratterizzare sotto il profilo idrochimico il flusso in alveo riferito a differenti momenti del ciclo idrologico annuo.

L'ubicazione delle sezioni di misura della portata non poteva prescindere dal sistema di derivazione delle acque fluviali, realizzato dall'Enel per la produzione di energia elettrica. La portata derivata dagli invasi artificiali ubicati sull'Aniene e sul Torrente Simbrivio, ^{vi'ene} ~~vengono~~ ← restituiti in alveo dopo turbinazione, a Subiaco, a monte della stazione idrometrica del Servizio Idrografico (365 m). Ogni settore di alveo controllato da misure di portata periodiche è generalmente compreso tra due invasi ENEL, per eliminare l'interferenza delle derivazioni sul sistema naturale di flusso, oppure tra sorgenti carsiche "localizzate" di particolare rilevanza in termini di portata.

3.3. Analisi dei dati sperimentali

Il reticolo idrografico dell'alto Aniene viene suddiviso in tre unità identificabili (i) nell'asta principale del F. Aniene, (ii) nel Torrente Simbrivio e (iii) nel Fosso Campo - Fosso dell'Obaco, tributario di sinistra dell'Aniene in corrispondenza di Ponte delle tartare (Trevi nel Lazio, 629 m s.l.m.).

Le unità identificate mostrano caratteri idrologici peculiari in funzione delle caratteristiche litologiche e della geometria sia superficiale che sotterranea del bacino di alimentazione. Mentre l'Aniene ed il Simbrivio presentano un regime di flusso perenne, il primo caratterizzato da più marcate oscillazioni delle portate attorno al valore medio, il sistema Fosso Campo - Fosso

dell'Obaco evidenzia un regime effimero, caratterizzato da prolungati periodi con esaurimento totale di scorrimento in alveo.

3.3.1. Fiume Aniene

Il fiume Aniene da Subiaco (365 m) alle sorgenti montane di Fiumata e Filetino (~1100 m), con una lunghezza prossima a 22 Km, è stato suddiviso in 8 settori (Fig. 3.2) ciascuno caratterizzato da condizioni di flusso generalmente omogenee nelle fasi dell'anno idrologico esaminato (1995). Ogni settore è definito da sezioni di misura di portata in ingresso ed in uscita e, ove presenti sorgenti localizzate nei pressi dell'alveo, da sezioni intermedie. Risulta in tal modo possibile definire con il monitoraggio mensile, il carattere idrodinamico "drenante" (incrementi di portata verso valle) o "perdente" del tratto di alveo considerato. Tale comportamento viene espresso dalla differenza (ΔQ) tra i valori di portata misurati in uscita (Q_u) ed in entrata (Q_e) del settore in esame ($\Delta Q = Q_u - Q_e$).

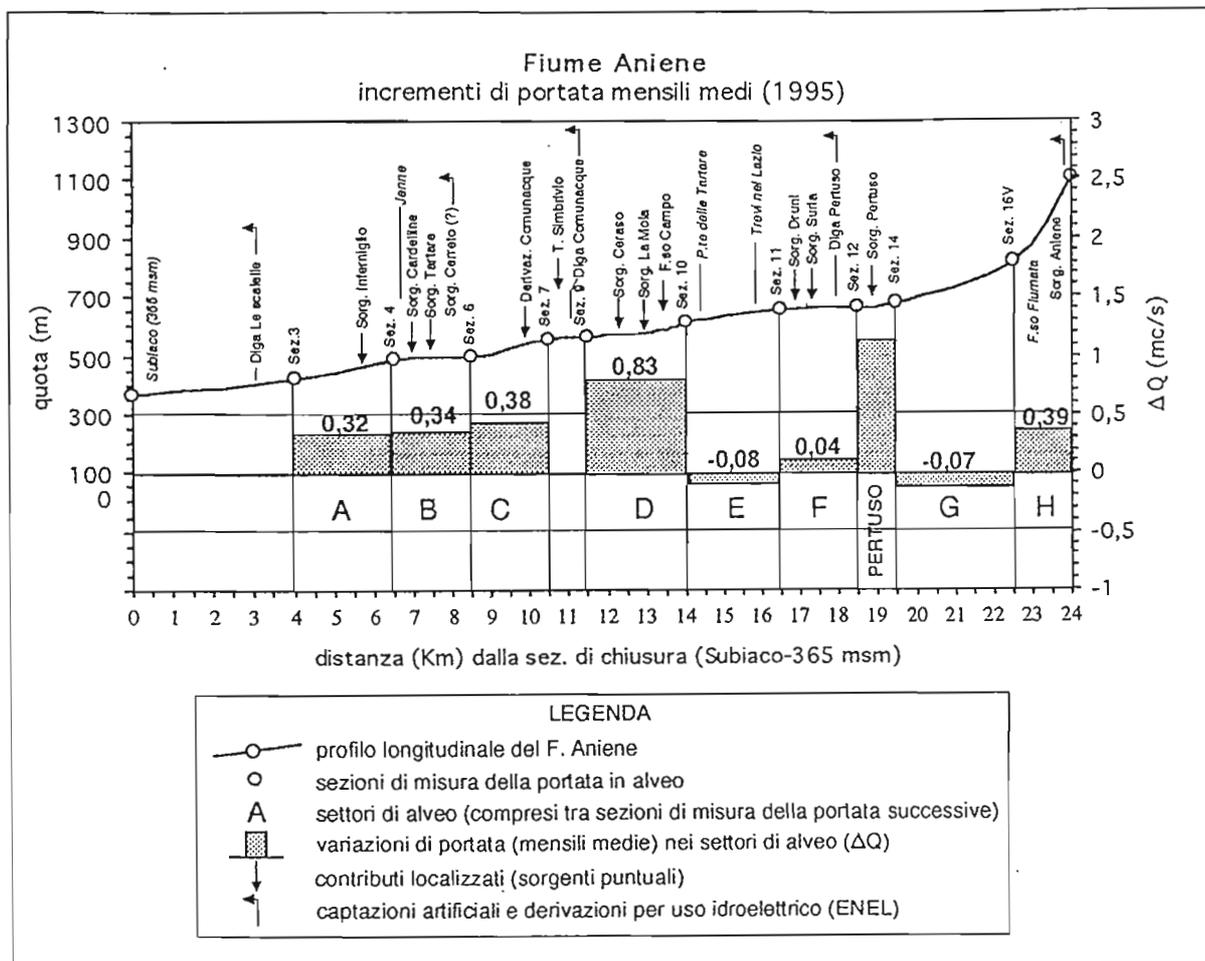


Fig. 3.2 - Profilo longitudinale e variazioni di portata nei settori di alveo del F. Aniene, da Filetino (1100 m) a Subiaco (365 m).

A valle della centrale idroelettrica "Le Scalelle", la restituzione in alveo della portata derivata più a monte, non consente di chiarire il carattere idrodinamico del tratto compreso tra Subiaco e la sezione di misura n. 3. Dall'analisi di Fig. 3.2 e della Tab. 3.1, in cui vengono considerati i valori mensili medi delle misure condotte durante il 1995, risulta evidente come il F. Aniene presenti nel complesso carattere drenante nei primi 4 settori (A, B, C, D), fino a Ponte delle Tartare (629 m) e perdente nei seguenti 3 (E, F, G), fino alla confluenza con il fosso di Fiumata. Il settore più montano (H) è caratterizzato da incrementi nei valori di portata corrispondenti, come è ovvio, a quelli misurati in uscita ($Q_e = 0$, $\Delta Q = Q_u$).

settore	corso d'acqua	lunghezza (Km)	ΔQ medio	contributi puntuali	ΔQ -contributi
			(a) (mc/s)	(b) (mc/s)	(a-b) (mc/s)
A	Fiume Aniene	2,5	0,32	0,43	-0,11
B	Fiume Aniene	2	0,34	0,2	0,14
C	Fiume Aniene	2,2	0,38	0,04	0,34
D	Fiume Aniene	2,4	0,83	0,75	0,08
E	Fiume Aniene	2,6	-0,08	0	-0,08
F	Fiume Aniene	2	0,04	0,015	0,025
G	Fiume Aniene	3,2	-0,07	0	-0,07
H	Fiume Aniene	1,5	0,39	-	0,39
I	T. Simbrivio	1	0,14	0,12	0,02
L	T. Simbrivio	5,8	0,33	0	0,33
M	F.so Campo	0,75	-0,37	0,37	-0,74
N	F.so Campo	1,25	-0,02	0,02	-0,04

Tab. 3.1 - Incrementi di portata mensili medi nei settori di alveo di Fig. 3.1. L'ultima colonna si riferisce all'incremento (o decremento) di portata escludendo ipoteticamente i contributi dovuti a sorgenti localizzate.

Un'analisi di dettaglio dei contributi delle sorgenti localizzate, misurati durante le campagne di rilevamento mensili, chiarisce il significato delle variazioni spaziali dei dati sperimentali.

Nel periodo di acquisizione dati (1995), al settore (A) si riferisce un incremento di portata tra le sezioni *ingresso-uscita* inferiore a quello erogato in media dalla sorgente Inferniglio (Fig. 3.1; 3.3A). Escludendo ipoteticamente il contributo di tale sorgente, il settore A risulterebbe perdente (cfr. Tab. 3.1).

Nel settore B si rileva un incremento di portata medio (ΔQ) di 0,34 m³/s. Esso viene alimentato da contributi puntuali (Sorgenti delle Tartare e dei Cardellini) per complessivi 0,2 m³/s (Fig. 3.3B). Tale valore è sottostimato in quanto non è stata considerata la portata della sorgente Cerreto, derivata dall'Ente acquedottistico del Comune di Subiaco per circa 45 l/s. Dal settore C si ricava un incremento medio di portata di 0,38 m³/s. Poiché non sono presenti sorgenti localizzate, con esclusione dell'esubero delle derivazioni Enel pari a 30-40 l/s, il carattere drenante dell'Aniene nel tratto in esame è dovuto ad incrementi linearmente distribuiti lungo

l'asta fluviale. A monte del settore C è ubicata la confluenza nell'Aniene del T. Simbrivio, tributario considerato separatamente nell'analisi idrodinamica del reticolo fluviale.

In uscita dal settore D si rileva il maggiore incremento medio di portata, pari a $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$.

La sommatoria dei contributi puntuali in tale tratto d'alveo riferiti alle sorgenti carsiche Mola e Ceraso, al contributo di Fosso Campo (S. Foce) e di due piccole sorgenti poste lungo l'Aniene poco a monte della centrale di Comunacque, risulta nel complesso di $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$. La componente ascrivibile alle sorgenti lineari ammonterebbe così a circa 80 l/s , valore confrontabile con l'errore di misura. A monte del settore D, l'Aniene presenta perdite in alveo, come confermato da precedenti lavori di tesi a partire dal 1991 (Percopo, 1991; Travia, 1992; Turco, 1993; Lodi, 1994; Pefumi, 1995). Dalla sezione di monte posta nei pressi dell'abitato di Trevi nel Lazio (sez. 11) fino al Ponte delle Tartare (sez. 12; sett. E), il decremento mensile medio è risultato di circa $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$. Si precisa che nel tratto d'asta corrispondente al citato settore non sono segnalate sorgenti puntuali. Il settore F dalla diga del Pertuso, a monte, fino alla sezione n. 11, presenta un incremento medio di $0,04 \text{ m}^3/\text{s}$. Il tratto di alveo in esame è alimentato da due sorgenti (Fonte Suria e Sorgente di Colle Druni) per complessivi $0,015 \text{ m}^3/\text{s}$. Il contributo della sorgente del Pertuso, con portata media (1995) di $1,54 \text{ m}^3/\text{s}$, viene considerato separatamente in questa analisi.

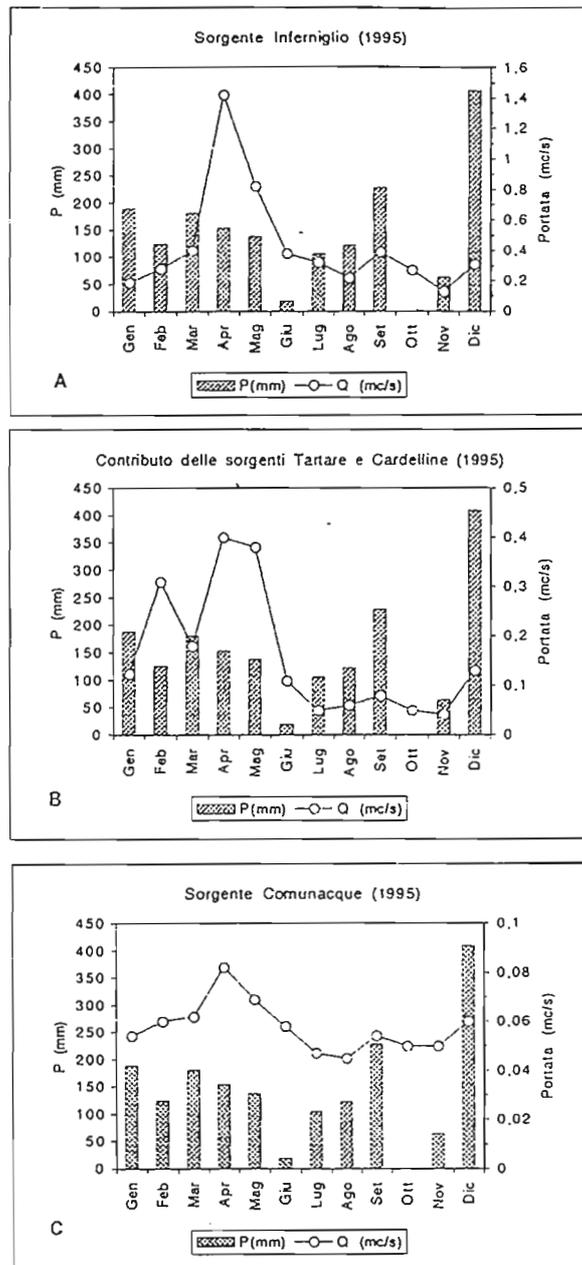


Fig. 3.3 - Idrogramma mensile delle sorgenti Infernioglio (A), Tartare e Cardelline (B) e Comunacque (C). Le precipitazioni si riferiscono ai dati registrati al pluviografo di Subiaco-Santa Scolastica (511 m), gestito dal Serv. Idrogr. di Stato (Roma).

La sorgente costituisce a monte di Trevi nel Lazio l'unico contributo localizzato con portata di rilevante entità, sostenendo in periodo di magra il flusso dell'Aniene.

Il settore G, privo di apprezzabili contributi localizzati, ha fatto rilevare decrementi nei valori di portata da monte verso valle. Al settore H, corrispondente alla porzione più montana del reticolo perenne, si riferisce un incremento medio alla sezione di uscita (sez. 16V) di circa $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3.2. Torrente Simbrivio

Il Torrente Simbrivio, di lunghezza di 7 Km dalla confluenza con l'Aniene fino all'abitato di Vallepietra, presenta comportamento drenante per tutto lo sviluppo del suo corso. Il tratto d'asta è stato suddiviso in due settori (settori I ed L; Fig. 1 e Fig. 3.4): il primo (I), con incremento medio di $0,14 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tab. 3.1) è alimentato dalla Sorgente di Comunacque, la cui portata media è risultata di $0,12 \text{ m}^3/\text{s}$ (Pefumi, 1995). Non sono note nel settore (I) altre emergenze puntuali di rilievo; ne consegue un contributo medio alla portata totale di circa $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$, ascrivibile a limitati apporti di sorgenti lineari.

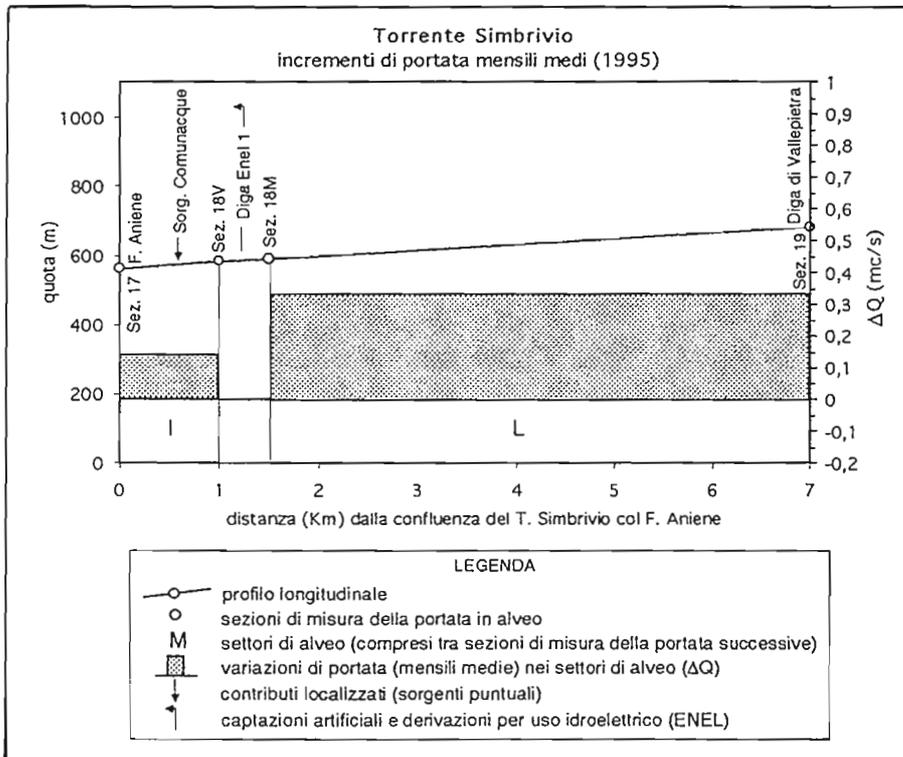


Fig. 3.4 - Profilo longitudinale e variazioni di portata nei settori di alveo del T. Simbrivio, da Vallepietra (700 m) alla confluenza con il F. Aniene (580 m).

Contrariamente al settore I, nel settore L sono localizzate piccole sorgenti con portata complessiva di pochi litri/secondo; esso presenta un incremento medio nei valori di portata di $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ pressoché interamente riferibile ad alimentazione diffusa per incrementi lineari in alveo.

3.3.3. Fosso Campo - Fosso dell'Obaco

Alla quota di 629 m, in corrispondenza delle Cascate di Trevi, l'Aniene riceve in riva sinistra il Fosso Campo la cui naturale prosecuzione a monte della sorgente Foce (635 m) prende il nome di Fosso dell'Obaco. Il regime del torrente è tipicamente carsico, con esaurimento completo dello scorrimento superficiale nei mesi di magra estiva segnato dalla scomparsa della sorgente Foce. Tale emergenza divide l'asta nei settori M ed N (Fig. 3.5), entrambi caratterizzati da condizioni di flusso con perdita in alveo ($-0,37 \text{ m}^3/\text{s}$ nel settore M e $-0,02 \text{ m}^3/\text{s}$ nel settore N). Nell'anno di acquisizione dati (1995) non è mai stato rilevato flusso nel Fosso Campo alla confluenza con il F. Aniene, mentre solamente nel periodo primaverile la sorgente che lo alimenta (Foce) era in erogazione. Il decremento medio di portata nel settore M (Tab. 3.1) è così riferibile alla portata media della sorgente Foce quando attiva. Il Fosso dell'Obaco (settore N) è alimentato dalla sorgente perenne di Capo d'Acqua. L'esigua portata erogata dalla sorgente ($\sim 15 \text{ l/s}$) si esaurisce tuttavia poche centinaia di metri a valle dell'emergenza.

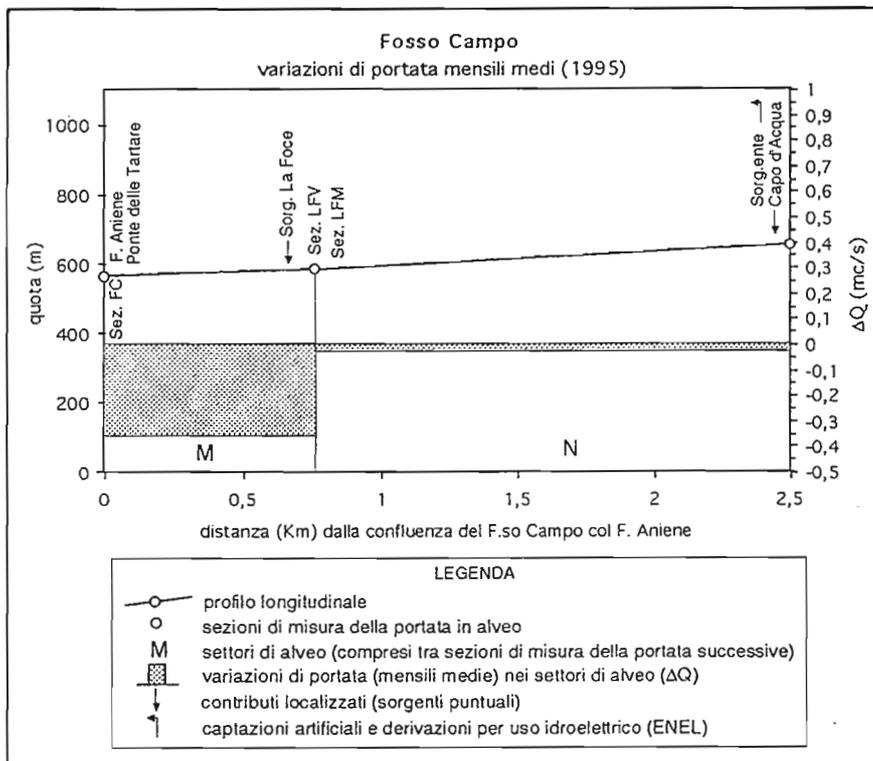


Fig. 3.5 - Profilo longitudinale e variazioni di portata nei settori di alveo del F.sso Campo, da Capodacqua (680 m) alla confluenza con il F. Aniene (595 m).

3.4. Considerazioni sulla dinamica acquifero-fiume e riflessioni sulla struttura del sistema carsico

Indagini idrologiche di dettaglio condotte in modo sistematico nel corso del 1995 consentono di precisare la dinamica delle interazioni tra l'acquifero carsico simbruino e il fiume Aniene. In particolare, il quadro desunto dalle variazioni di portata (Fig. 3.2) e l'analisi dei contributi

puntuali lungo il reticolo idrografico (Tab. 3.1) offrono una valutazione di dettaglio delle modalità di alimentazione del corso d'acqua da parte della falda che satura la base del serbatoio carsico.

Se ad una scala delle osservazioni regionale o comunque da un quadro conoscitivo di scarso dettaglio, è lecito considerare come linearmente diffusi lungo l'alveo i contributi di portata che l'asta fluviale riceve, le condizioni idrodinamiche del fiume desunte su basi conoscitive di maggior dettaglio evidenziano le peculiarità proprie degli acquiferi carsici. Gran parte dei contributi misurati, infatti, è dovuta agli apporti delle principali sorgenti carsiche ubicate nei pressi e alla quota della linea di *talweg* del reticolo perenne. Così il settore di alveo compreso tra Subiaco e Ponte delle Tartare è alimentato prevalentemente dalle sorgenti carsiche 'localizzate', mentre è riferibile a circa il 20% del totale l'aliquota attribuibile ad apporti per drenaggio diffuso ('sorgenti lineari').

3.5. Considerazioni conclusive

Il modello di circolazione che deriva dai dati e dalle osservazioni sperimentali, evidenzia il ruolo idrodinamico delle linee di drenaggio sviluppate nei condotti carsici maggiori e nelle principali discontinuità strutturali. Il Fiume Aniene intercettando sia (i) il reticolo carsico maggiore sia (ii) il reticolo di fessure e di microfessure, sede di drenaggio diffuso, risulterebbe alimentato prevalentemente dal primo. Sebbene risulti evidente il contributo di portata associato al reticolo minore di fessure, questo costituisce solamente una piccola parte della risorsa idrica che sostiene in generale il flusso di base. Essa rappresenta, tuttavia, nel periodo di esaurimento estivo-autunnale tanto in zona satura quanto in zona areata, una importante risorsa in grado di alimentare in periodo di recessione il flusso nei condotti carsici e lo stillicidio osservato in grotta (Inferniglio). Il modello idrodinamico che si desume pone in rilievo due diverse modalità di circolazione nella roccia serbatoio, rispettivamente nei condotti e nel reticolo di fessure, tra loro interagenti con scambi reciproci in funzione delle variazioni dei potenziali idraulici nel reticolo carsico gerarchizzato (Drogue, 1992). Il contributo prevalente riferibile all'una o all'altra modalità di circolazione varia in funzione degli apporti meteorici e della intensità delle precipitazioni, così come evidenziato dalle osservazioni di campo.

4

La sorgente carsica dell'Inferniglio

4.1. Introduzione

La sorgente carsica Inferniglio (504 m) è ubicata, lungo il Fiume Aniene, nel settore montano della catena simbruina. Assieme alla omonima grotta, il cui ingresso dista circa 50 m dall'emergenza, costituisce un complesso sistema carsico oggetto di monitoraggio sistematico da parte di ricercatori del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università "La Sapienza" (Roma), a partire dal 1991. Tuttavia solamente dall'Agosto 1996 la registrazione dei dati idrologici e chimico-fisici delle acque sorgentizie viene eseguita in continuo da una centralina automatica equipaggiata di sonda multiparametrica ad immersione.

Rispetto alle precedenti acquisizioni con strumenti portatili e con periodicità mensile (oraria nel caso di eventi di flusso particolarmente intensi), i dati di cui è possibile disporre consentono una analisi più particolareggiata dei processi di circolazione e di interazione 'acqua-roccia' nel reticolo carsico. L'interpretazione delle serie cronologiche disponibili offre un ulteriore contributo alla definizione quantitativa di un modello di circolazione nell'acquifero carsico, sulla base del confronto dei dati idrologici e chimico-fisici riferiti all'Inferniglio.

4.2. Inquadramento geologico-strutturale dell'area

Nell'area della Sorgente Inferniglio sono presenti unità stratigrafiche in *facies* laziale-abruzzese, prevalentemente calcareo-dolomitiche del Cretacico superiore (Accordi *et al.*, 1988; Parotto & Praturlon, 1975). Nei pressi dell'abitato di Jenne affiorano, in paraconcordanza sul substrato cretacico, i "Calcari a Briozoi e Litotamni" del Serravalliano-Langhiano. Unità terrigene altomioceniche, in rapporto tettonico con i termini della sequenza carbonatica mesozoica, completano il quadro litostratigrafico del settore di catena a cui fa riferimento la sorgente (Fig. 4.1).

Nell'area in esame vengono riconosciuti motivi legati alla tettonica compressiva (Parotto *et al.*, 1992), con retroscorrimenti e movimenti orizzontali. Dislocazioni fragili di tipo distensivo, orientate WNW-ESE, si sovrappongono agli elementi tettonici compressivi quali il retroaccavallamento di Monte Porcaro (Naso *et al.*, 1990), ubicato poco a monte del sistema carsico che alimenta la sorgente Inferniglio. L'unità carbonatica mesozoica è interessata da un complesso sistema di fratture e fessure da cui, in favorevoli condizioni climatiche, si sono sviluppate forme carsiche, epigee ed ipogee, tra loro integrate in un sistema reticolare bene gerarchizzato. Ai condotti di grandi dimensioni, sia verticali che a prevalente sviluppo

orizzontale, convergono sistemi di fessure anastomizzate e di dimensioni variabili, caratterizzati rispettivamente da differenti modalità di flusso delle acque di infiltrazione.

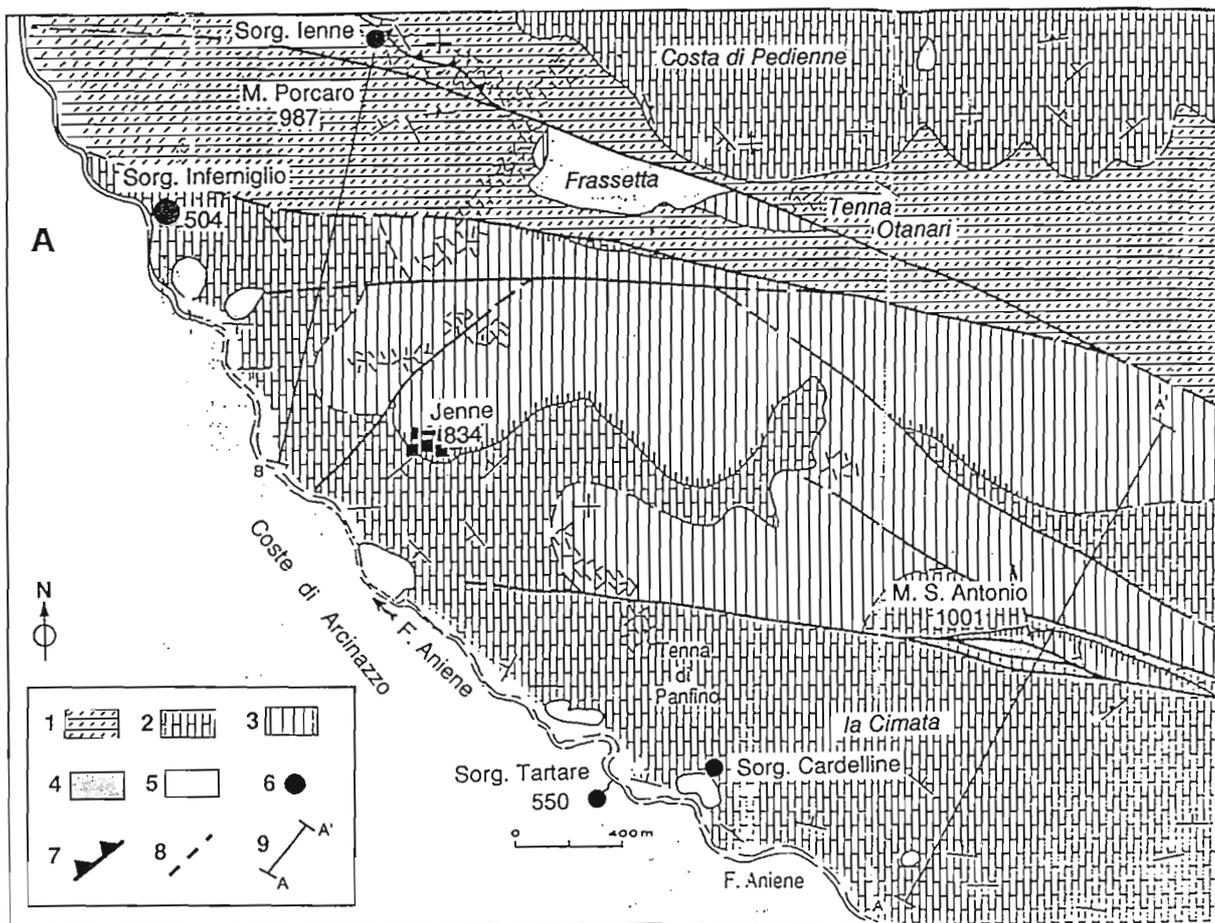
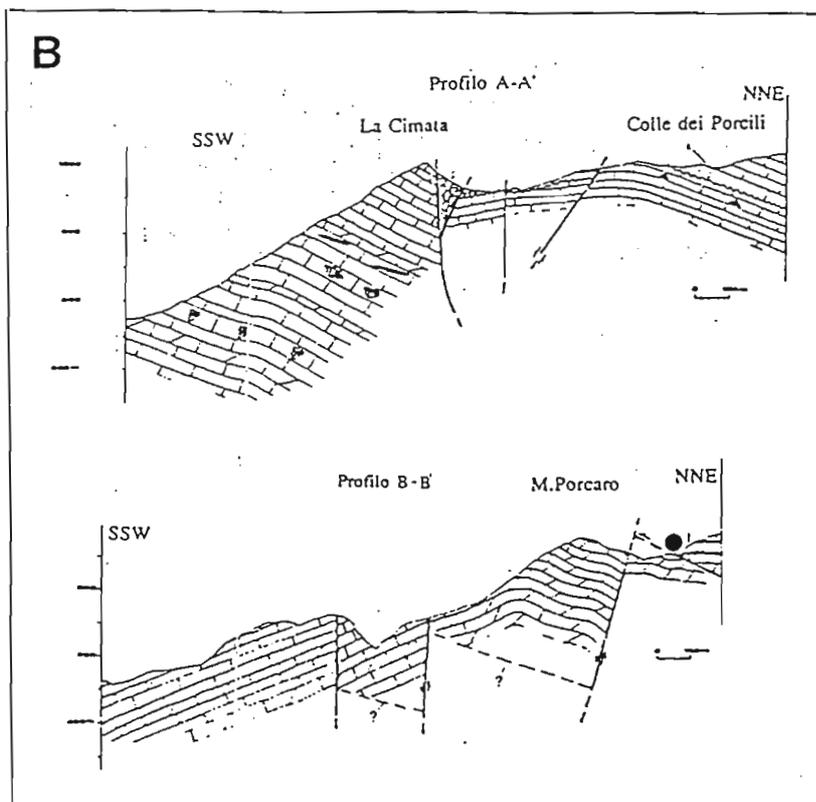


Fig. 4.1 - Schema geologico dell'area di Jenne. Legenda: 1) Dolomie e calcari dolomitici (Cenomaniano p.p.); 2) Calcari a rudiste (Maastrichtiano (?), Senoniano-Turoniano); 3) 'Calcari a Briozoi e Litotamni' Aucutt. (Serravalliano p.p.-Langhiano p.p.); 4) depositi terrigeni (Miocene superiore s.l.); 5) coperture eluviali, residuali e detritiche (Quaternario); 6) sorgenti localizzate (La sorgente "Ienne", alimentata da una falda epicarsica (prof. B-B') è a quota 825 m); 7) retroaccavallamento (M. Porcaro); 8) Faglia (a tratteggio se ipotizzata); 9) traccia delle sezioni geologiche. (Da Parotto M., Tallini M. & Tozzi M. - 1990)



4.3. Stazione di monitoraggio "Inferniglio"

La centralina di monitoraggio, ubicata presso la sorgente carsica Inferniglio (Fig. 4.2), prevede la registrazione in continuo dei seguenti parametri idrologici e chimico-fisici delle acque:

- livello idrometrico (cm);
- pressione atmosferica (mbar);
- temperatura dell'aria e dell'acqua (°C);
- concentrazione ione idrogeno (pH);
- conducibilità elettrica a 20°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$);
- potenziale di ossidoriduzione (Redox);
- ossigeno disciolto ($\text{mg}/\text{l O}_2$);
- torbidità (NTU).

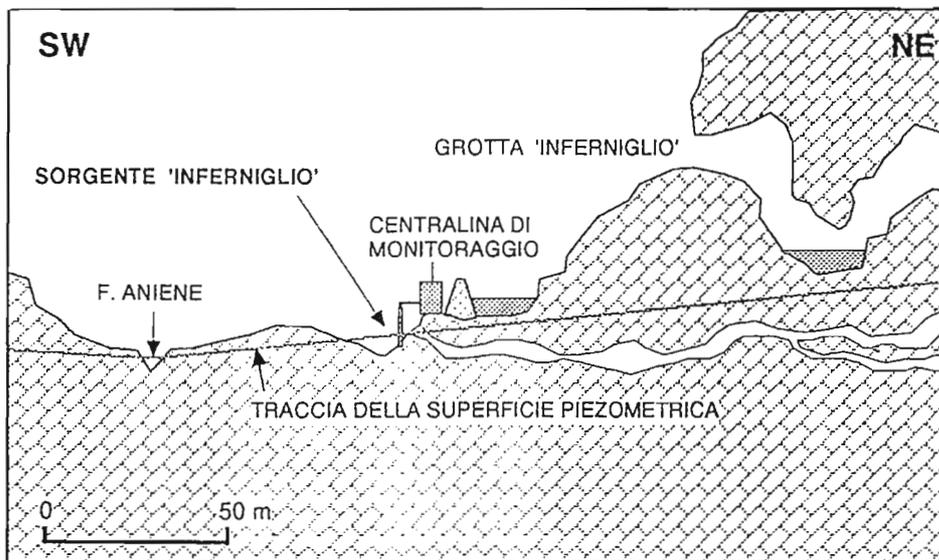


Fig. 4.2 - Sistema carsico della sorgente Inferniglio (504 m) attraverso una sezione schematica della valle del Fiume Aniene.

L'intervallo di acquisizione dati nelle condizioni ordinarie di flusso è di 30 minuti, mentre nelle condizioni critiche (eventi di piena) viene posto a 10 minuti. La centralina di monitoraggio ha iniziato ad acquisire dati con regolarità a partire dal mese di Agosto 1996. Attualmente si dispone delle registrazioni relative al ciclo idrologico 1996-1997 (Agosto '96 - Settembre '97; Fig. 4.3), con episodiche interruzioni nella serie di dati dovute a problemi nel software che gestisce le acquisizioni.

Le acquisizioni vengono eseguite da una sonda multiparametrica (AMEL) permanentemente immersa in acqua, alla sorgente, ad una profondità fissa. I valori idrometrici sono pertanto correlati alla variazione di pressione sul battente d'acqua sul sensore. La centralina compie letture in memoria mobile ogni 5 minuti, quindi ne media e registra i valori su memoria rigida

ogni mezz'ora o secondo l'intervallo temporale stabilito. La capacità di immagazzinamento dati nella unità di acquisizione ('data logger'), è di 60Mb di memoria rigida.

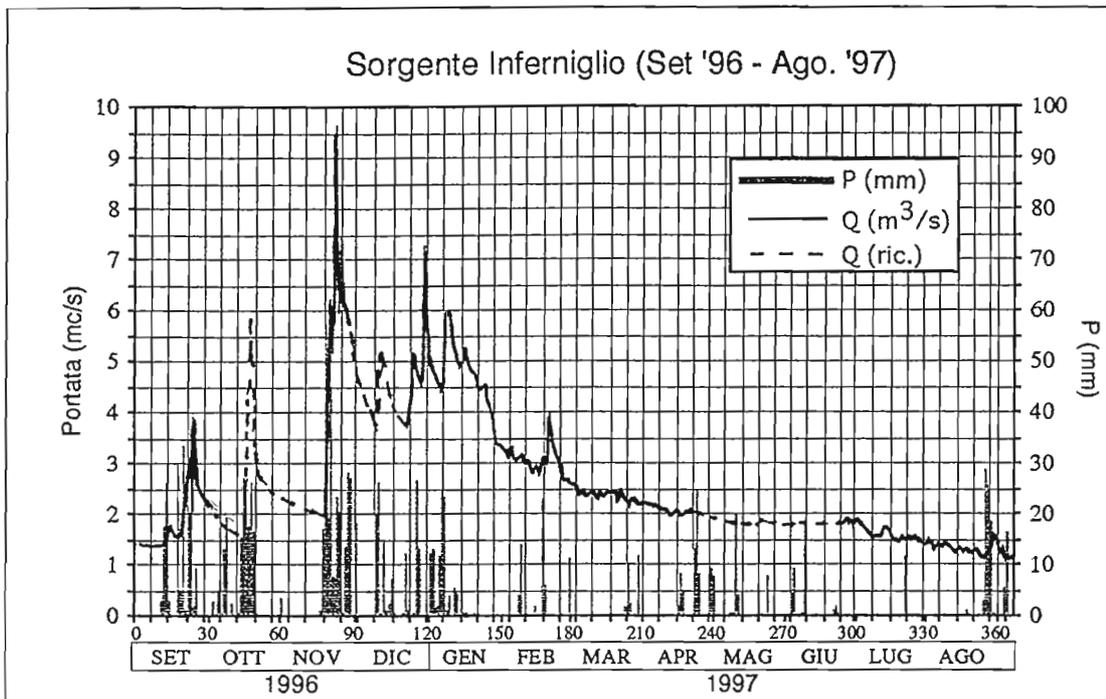


Fig. 4.3 - Ciclo idrologico 1996-1997 della Sorgente Inferniglio. I dati acquisiti fanno riferimento a registrazioni semiorarie (le linee tratteggiate rappresentano le ricostruzioni dei valori di portata mancanti). Le precipitazioni (semiorarie) sono riferite al pluviografo di Subiaco-Santa Scolastica (511 m, Serv. Idr. - Roma).

4.4. Analisi dei dati

L'elaborazione dei dati acquisiti si è concentrata soprattutto nell'analisi degli eventi critici che hanno interessato la sorgente nel periodo di funzionamento della stazione automatica, con lo scopo di focalizzare quali meccanismi regolino la circolazione sotterranea nell'acquifero carsico di un sito campione (Klimchouk A., 1995). Dall'analisi degli eventi di flusso critici è possibile, infatti, trarre indicazioni sul processo di interazione acqua-roccia ed individuare le componenti principali che alimentano la portata della sorgente durante il ciclo di piena, discriminando il flusso di base ("baseflow") dal flusso rapido ("quickflow") attraverso i condotti carsici della zona areata (Padilla *et al.*, 1994). La portata dell'emergenza negli episodi di flusso critico risulta, infatti, costituita dalla miscelazione di più matrici riferibili a circuiti differenti nella roccia serbatoio, convergenti alla sorgente (Hess & White, 1988).

La differente connotazione chimica e fisica delle acque che si rileva all'emergenza, deriva da condizioni idrodinamiche che si sviluppano nelle zone areata e satura della roccia serbatoio in rapporto alla distribuzione e alla intensità delle precipitazioni che determinano l'evento critico, oltre che ai processi di interazione acqua-roccia.

Per la Sorgente Inferniglio vengono riconosciuti *end-members* idrochimici che fanno riferimento rispettivamente al "diffuse-flow" e "conduit-flow" (Shuster & White, 1971), oltre che il prodotto della loro interazione nel ciclo temporale dell'evento.

La serie cronologica dei dati dal periodo di magra del Settembre 1996 a quello dell'Agosto 1997 (Fig. 4.3), viene suddivisa in 3 fasi idrologiche relative a: (i) ricarica del serbatoio carsico dopo la magra estiva (Settembre 1996), (ii) eventi di piena del periodo autunno-invernale, (Nov. - Dic. 1996), (iii) eventi di morbida del periodo primaverile 1997.

L'analisi degli eventi di flusso che caratterizzano la ricarica dell'acquifero carsico e il periodo di massimo immagazzinamento procede cronologicamente con le serie dei dati acquisiti, con lo scopo di portare un contributo alle conoscenze sulla dinamica di alimentazione di una sorgente carsica, a cui fa riferimento una struttura fisica della roccia serbatoio ad alta anisotropia.

4.4.1. Descrizione delle matrici che alimentano la Sorgente Inferniglio

Le diverse matrici liquide riconosciute dall'analisi degli idrogrammi, come esposto nei successivi paragrafi, vengono descritte per una migliore comprensione dei processi dinamici nella roccia serbatoio che alimentano il flusso della sorgente carsica Inferniglio. Le componenti possono essere identificate nelle seguenti matrici:

4.4.1.1. Matrice del serbatoio epicarsico

La piccola ed effimera sorgente di Jenne, ubicata ai limiti del retroscorrimento di Monte Porcaro (Fig. 4.1), viene considerata per le sue caratteristiche chimico-fisiche e per la connotazione geometrica e litologica del serbatoio sospeso che la alimenta, rappresentativa delle risorse idriche dell'epicarso. La matrice liquida rappresenta la componente più mineralizzata del sistema carsico (Fig.4.4a) con valori di conducibilità elettrica superiori a 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e condizioni di sovraturazione rispetto alla calcite (Fig. 4.4c). Essa inoltre presenta valori di pH lievemente maggiori di quelli che caratterizzano le acque del flusso di base;

4.4.1.2. Flusso veloce nella rete di macrocondotti ("quick-flow"):

Le acque meteoriche si infiltrano rapidamente nella rete dei condotti carsici ipogei, verso cui converge in particolari condizioni di alimentazione anche lo scorrimento di superficie che si genera episodicamente sui pianori carsici (polje, uvala, doline). I condotti carsici e i sistemi di fratture che collegano l'epicarso alla zona satura dell'idrostruttura, hanno prevalente sviluppo verticale, come si desume dai dati speleologici e come si rileva sulle pareti della grotta Inferniglio dove episodicamente si attiva lo stillicidio.

La connotazione delle acque che seguono percorsi veloci nella zona areata del serbatoio carsico con tempi brevi di interazione con la fase solida, presenta marcata affinità con il chimismo delle precipitazioni. La matrice della sorgente Inferniglio nelle condizioni dinamiche di "quick-flow" denota minori tenori di mineralizzazione e di pH.

A maggior ragione lo stillicidio, allorché di flusso abbondante, presenta caratteristiche chimico-fisiche analoghe alle acque sorgentizie, coerentemente con il prevalere di condizioni dinamiche di "quick-flow" nella zona areata del serbatoio.

4.4.1.3. Flusso diffuso nel reticolo di fessure ("diffuse-flow")

Tale matrice si identifica con le acque che alimentano lo stillicidio attraverso il reticolo anastomizzato di microfessure, rilevabile in grotta come gocciolamento episodico dalla zona areata del serbatoio carsico. La mineralizzazione di tale matrice è confrontabile con quella dell'epicarso, a cui si riferisce la sorgente Jenne. Il pH e la conducibilità sono in media più elevati in valore rispetto alle acque del flusso di base, come si rileva dai dati di campo riportati in Fig. 4.4 (periodo: Gennaio -Dicembre 1995). Macrocondotti e fratture beanti sono osservabili sulle pareti e alla base della grotta Inferniglio che è esplorabile, senza particolari difficoltà, per una lunghezza di circa 300 metri dall'ingresso.

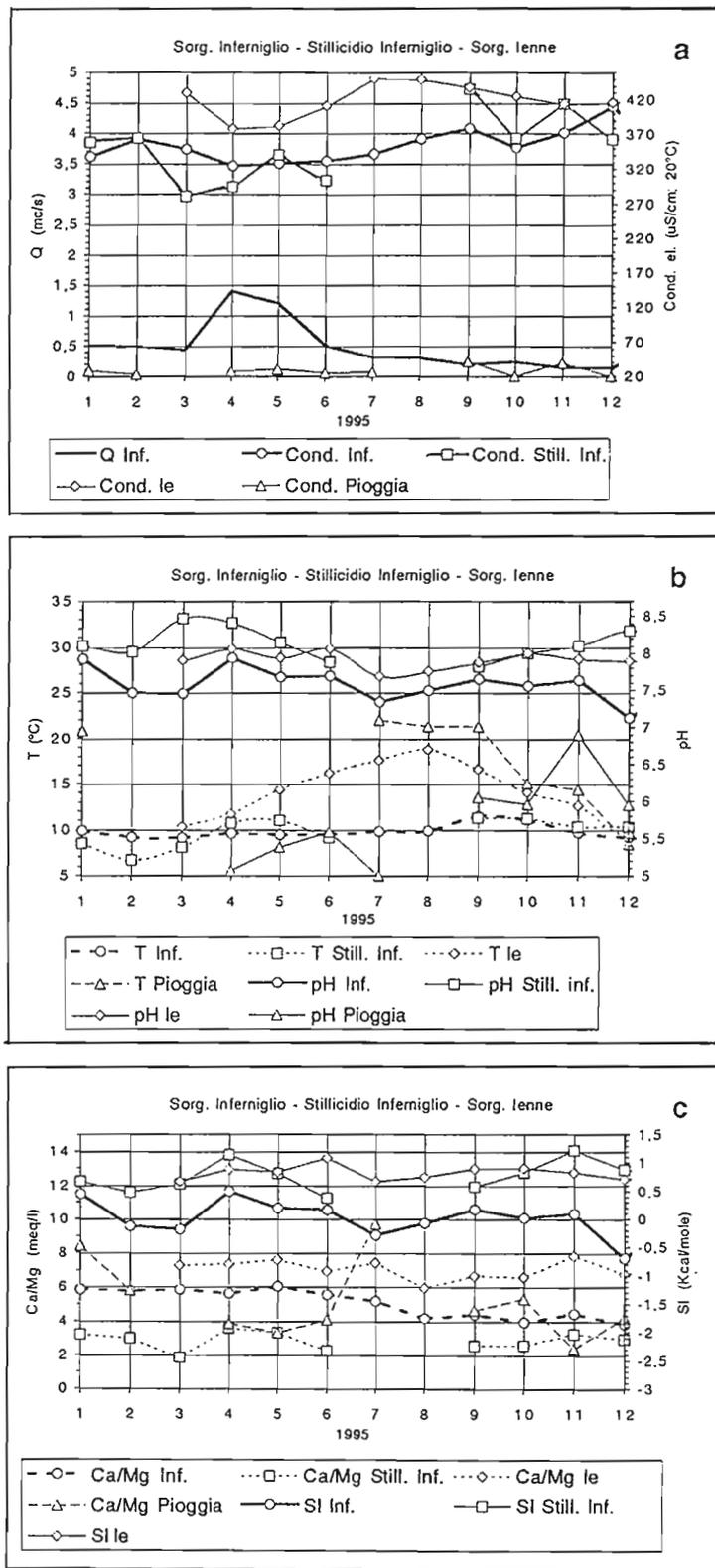


Fig. 4.4 - Confronto tra i parametri chimico-fisici delle acque sotterranee delle sorgenti Inferniglio ('Inf.') (504 m), nelle condizioni non influenzate dalle precipitazioni (flusso di base) - Stillicidio nella Grotta Inferniglio ('Still. Inf.'), rappresentativo delle acque di circolazione nel reticolo di fessure nella zona arata del serbatoio - Sorgente Ienne ('Ie') (825 m), rappresentativa delle matrici dell'epicarso - PioGGia, campionata a quota 504 m, nei pressi della Sorgente Inferniglio.

In particolare, dalla volta del condotto principale, a circa 30 m dall'ingresso, è stato prescelto il punto di campionamento dello stillicidio, in corrispondenza di una frattura. Non sono state eseguite misure di flusso durante il prelievo dello stillicidio, ma da osservazioni dirette si è constatata una consistente alimentazione durante il primo semestre 1995 ed in particolare nei mesi Marzo-Aprile quando la sorgente ha raggiunto il massimo valore di portata delle condizioni non influenzate da precipitazioni ($\sim 1,5 \text{ m}^3/\text{s}$, Fig. 4.4). In Giugno lo stillicidio si riduce considerevolmente, sino ad esaurirsi in Luglio, allorché la sorgente entra nella fase di recessione che, nonostante alcuni episodi di morbida in Ottobre, si protrae sino a Dicembre 1995. A partire da Settembre 1995 lo stillicidio in grotta si riattiva divenendo abbondante in occasione di eventi di pioggia occorsi in Ottobre. Si precisa tuttavia che a partire da Settembre il campionamento dello stillicidio è stato eseguito a circa 300 metri dall'ingresso della cavità carsica, poiché ancora nullo nel punto di prelievo consueto, ubicato nei pressi dell'accesso in grotta.

4.4.1.4. Flusso di base ("base-flow")

Le acque che alimentano la portata della sorgente Inferniglio sia nei periodi di recessione che al termine della fase di scarica di eventi di flusso critici, sono rappresentative del flusso di base. Tale flusso si identifica, in teoria, con una matrice chimica non influenzata dalle risorse dinamiche proprie del "quick-flow". La mineralizzazione delle acque riferite al flusso di base risulta minore della matrice epicarsica e di quella che alimenta il "diffuse-flow" nella zona areata dell'idrostruttura, mentre è maggiore rispetto alle acque di circolazione veloce ("quick-flow") nel reticolo macrocarsico dell'insaturo. Anche i valori di pH delle acque che alimentano il "base-flow" sono minori rispetto a quelli delle matrici liquide sopra citate.

In Figura 4.5 viene schematicamente rappresentata la curva dei deflussi di un evento critico, con la suddivisione dell'idrogramma semplice nelle fasi di concentrazione, scarica, e recessione.

4.5. Presentazione e discussione dei dati di monitoraggio della sorgente Inferniglio.

4.5.1. I FASE (Settembre 1996) - Fig. 4.6

4.5.1.1. EVENTO A

Il primo evento di morbida che si registra alla sorgente Inferniglio (13-14 Set. 1996), a partire dall'inizio delle acquisizioni alla centralina automatica, fa seguito al periodo di magra persistente dal mese di Maggio 1996 (Fig. 4.6).

Il baricentro delle precipitazioni che provocano l'incremento nei valori di flusso sino al picco di $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$, si colloca circa 20 ore prima della massima portata registrata all'emergenza, con precipitazioni di intensità media di $2,5 \text{ mm/h}$.

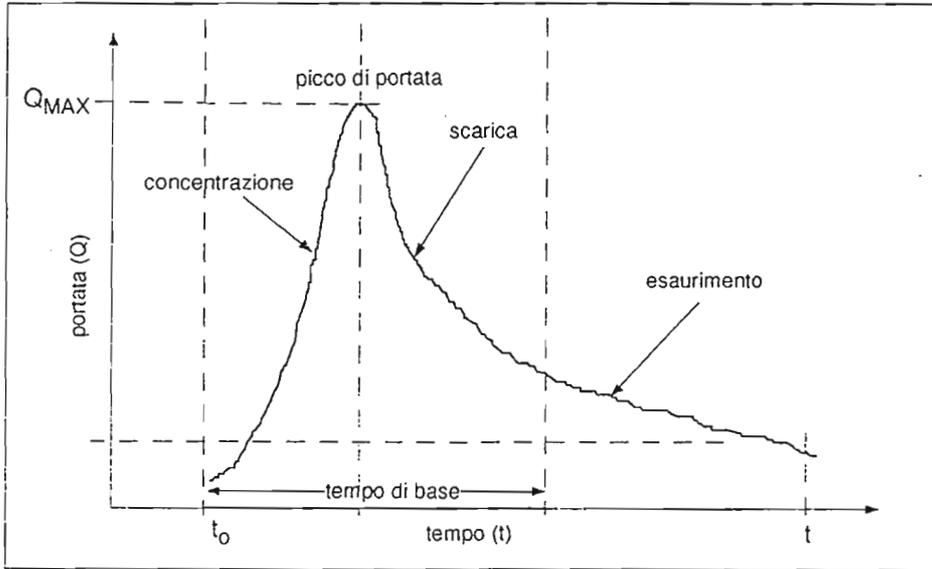


Fig. 4.5 - Rappresentazione delle diverse parti di un idrogramma semplice: fase di *concentrazione*, *picco di piena*, *scarica*, fase di *esaurimento*. Il tempo di base viene definito dall'inizio della *concentrazione* e la fine della *scarica*.

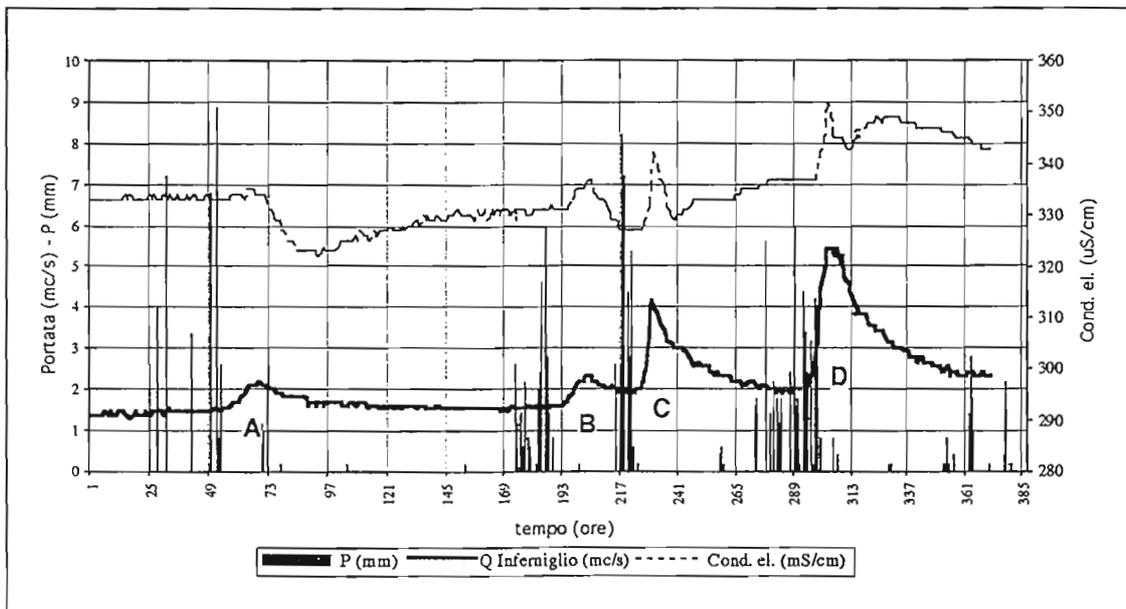


Fig. 4.6 - Sorgente Inferniglio (504 m): idrogramma del periodo 11-26 Settembre 1996 (Eventi A-B-C-D, I fase). Le portate sono state registrate, alla centralina di monitoraggio della sorgente, con intervallo di acquisizione di 30 minuti. Le precipitazioni (semiorarie) sono riferite alla stazione pluviometrica di Subiaco-Santa Scolastica (511 m) gestita dal Servizio Idrografico (Roma).

Nelle fasi che precedono la rialimentazione del sistema carsico, con precipitazioni caratterizzate da valori di conducibilità elettrica compresi tra 20 e 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$, il flusso di base presenta conducibilità di circa 330 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valore caratteristico delle condizioni di esaurimento dell'acquifero carsico. In corrispondenza del colmo di flusso, la conducibilità elettrica inizia a

decreocere fino al minimo di circa 320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ riferito al termine della scarica rapida. A partire dal momento in cui si esaurisce la scarica rapida, la conducibilità aumenta con gradualità tendendo al valore che precede l'evento critico.

Il pH subisce al picco di flusso un decremento di circa 0,1 unità, riportandosi ai valori che precedono l'evento durante la fase di esaurimento (Fig. 4.9C). Anche la temperatura dell'acqua presenta una variazione negativa dei valori seguita da lievi incrementi analogamente alla conducibilità elettrica. I dati idrologici e idrochimici caratteristici dell'evento A fanno ipotizzare in questa fase due processi idrodinamici principali:

- ricarica dell'acquifero epicarsico, in forte esaurimento durante il periodo estivo, con matrici "fresche" che ricostituiscono le risorse del serbatoio sospeso e riattivano il "diffuse-flow" nel reticolo anastomizzato di microfessure della zona areata;
- alimentazione della sorgente Inferniglio prevalentemente con matrici "fresche", caratterizzate da bassi valori di pH e dell'indice di saturazione rispetto alla calcite e bassi valori di conducibilità elettrica, trasmesse dalla superficie attraverso il reticolo macrocarsico della zona areata ("conduit-flow"; Miller, 1983; Williams, 1983; Hess & White, 1988).

L'aliquota di flusso rapido ("conduit-flow") che raggiunge la sorgente si miscela con acque del flusso di base ("base-flow"), nelle condizioni di avanzata recessione, modificandone il chimismo in funzione degli apporti dall'insaturo (Fig. 4.7).

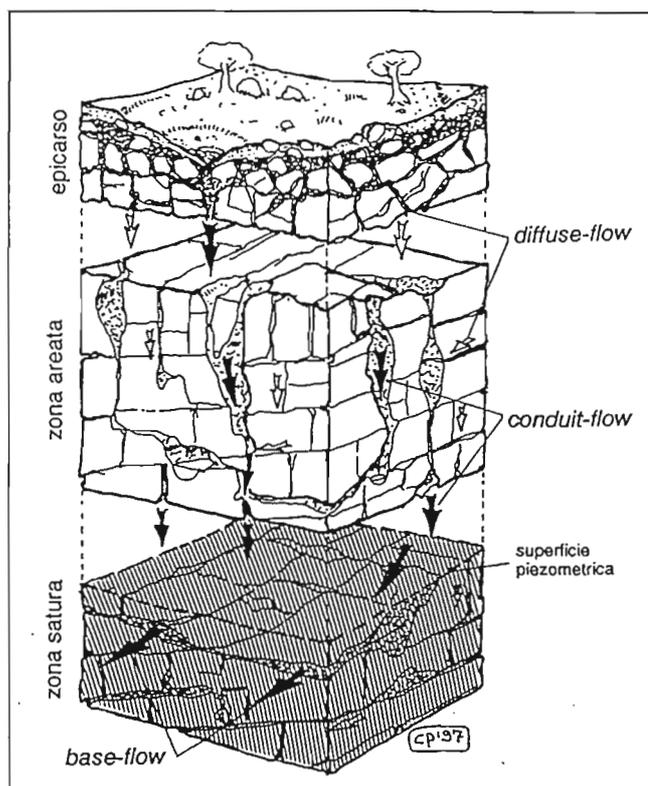


Fig. 4-7 - Schema esemplificativo della zonazione verticale del serbatoio carsico. Dall'*epicarso*, corrispondente alla fascia più corticale intensamente alterata e fratturata, si sviluppano reticoli paralleli di condotti, prevalentemente verticali, di fratture e di microfessure che raggiungono la zona satura dell'acquifero regionale. In zona satura, la circolazione che alimenta il flusso di base converge con movimento prevalentemente laterale dal reticolo carsico minore nei condotti a sviluppo suborizzontale, ai cui limiti è ubicata la sorgente. Le frecce nere indicano il *conduit-flow*, quelle bianche il *diffuse-flow*.

4.5.1.2. EVENTI B-C-D

Circa 6 giorni dopo il primo evento di morbida, nel periodo 18-25 Settembre 1996 si registrano eventi di flusso generati da maggiori e più intense precipitazioni (Fig. 4.8).

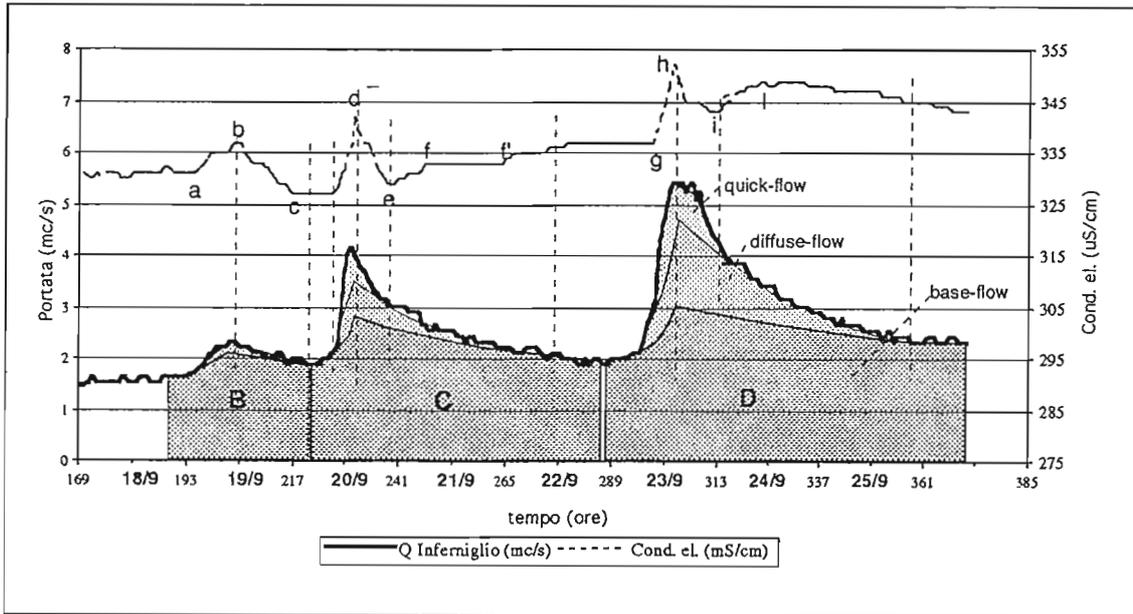


Fig. 4.8 - Sorgente Inferniglio (504 m): idrogramma del periodo 18-26 Settembre 1996 (Eventi B-C-D, I fase). Confronto con i valori della conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C) (intervallo di acquisizione dati di 30 minuti).

Il primo di tali eventi (evento B) evidenzia un progressivo incremento dei valori di conducibilità elettrica sino a $338 \mu\text{S}/\text{cm}$ (20°C) al picco di flusso ($\sim 2,2 \text{ m}^3/\text{s}$), mentre non subiscono significative variazioni i valori di pH (Fig. 4.9C). Durante la fase di scarica la conducibilità decresce rapidamente fino al minimo di $328 \mu\text{S}/\text{cm}$ al termine del periodo di esaurimento (punto c). Il flesso dei valori di conducibilità elettrica registrato con la variazione di pendenza della curva delle portate, segnando il passaggio tra la fine della scarica e l'inizio della fase di recessione.

Il secondo evento (evento C, Fig. 4.8) mostra, in analogia con quanto osservato precedentemente, un progressivo incremento di conducibilità elettrica durante la fase di concentrazione, con massimo di $342 \mu\text{S}/\text{cm}$ nell'intorno del picco di flusso ($\sim 4 \text{ m}^3/\text{s}$; (punto d). Segue un decremento rapido dei valori fino al termine della scarica (punto e). Con l'attenuazione della pendenza della curva dei deflussi, la conducibilità elettrica riprende a crescere fino a $333 \mu\text{S}/\text{cm}$ (punto f), oltre cui le variazioni del parametro tendono a stabilizzarsi con lievi incrementi fino agli inizi del successivo evento critico (punto g). I valori di pH subiscono un rapido decremento a partire dal picco di piena, da circa 7,8 a 7,65 unità (punto b, Fig. 4.9C). Nella fase di recessione dell'evento la curva di pH inverte tendenza, con graduale

aumento dei valori in accordo con la diminuzione di portata della sorgente sino al termine dell'evento (punto g). Le variazioni dei valori di temperatura dell'acqua seguono in buon accordo quelle della conducibilità elettrica, nell'intervallo compreso tra 8,5 e 9 °C.

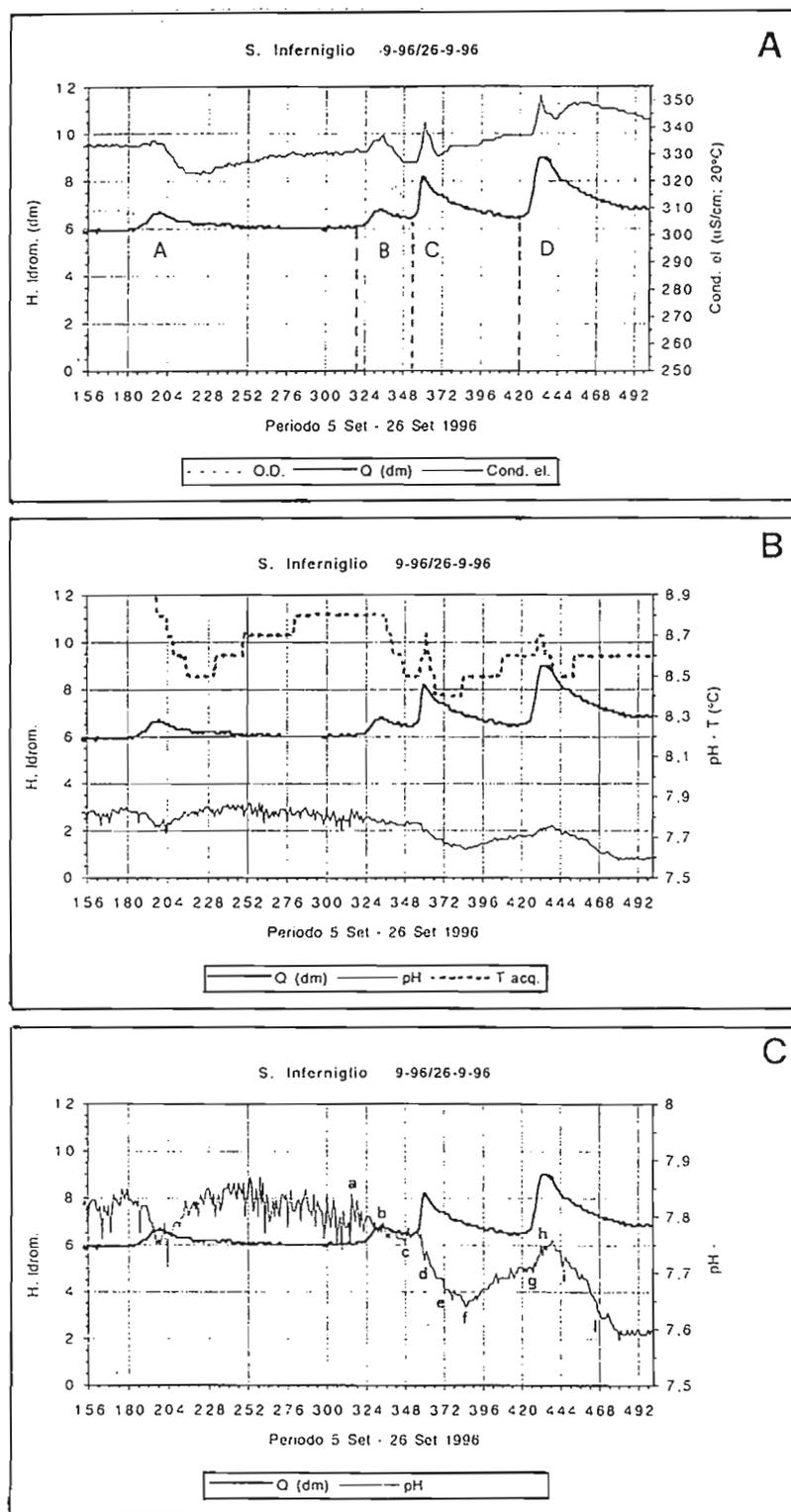


Fig. 4.9 - Sorgente Inferniglio (504 m): idrogramma del periodo 11-26 Settembre 1996 (Eventi A-B-C-D, I fase). Confronto tra i valori di portata (espressi come altezza di livello idrometrico all'esutore (dm)) ed i valori di conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C), pH e temperatura ($^\circ\text{C}$) dell'acqua (intervallo di acquisizione dati di 30 minuti).

L'incremento dei valori di conducibilità elettrica sino al picco di portata e il decremento dei tenori nella fase di scarica, viene correlato al "pistonaggio" di acque più mineralizzate di quelle che alimentano il flusso di base (Kozel *et al.*, 1986) nelle condizioni ordinarie di flusso.

Si ritiene che le matrici mobilizzate da sovrappressioni prodotte dall'infiltrazione di nuove risorse, siano residenti nel reticolo epicarsico di microfessure. Queste, miscelate in proporzioni variabili al flusso di base, precedono l'arrivo del "quick-flow" che, di contro, prevale dal picco di piena sino la termine della fase di scarica, in cui tende ad esaurirsi lo svuotamento della rete di macrocondotti nella zona areata. Di seguito diventa via via prevalente, nella formazione della portata della sorgente, l'alimentazione del reticolo carsico minore (fessure e microfessure) con tenori di mineralizzazione delle acque superiori a quelli associati al flusso di base. Si tratta di matrici liquide, relativamente "fresche", infiltratesi nel reticolo di fessure della zona areata, in seguito alle precipitazioni occorse dal primo degli eventi (evento A) dopo la magra estiva. In forte disequilibrio chimico con la roccia serbatoio, le acque di infiltrazione recente sarebbero in grado di acquisire un mineralizzazione maggiore di quella riferibile al flusso di base, nonostante minori tempi di residenza nel serbatoio carsico areato.

Vengono così discriminate quantitativamente nell'idrogramma le aliquote di matrici riferibili a due circuiti paralleli della zona areata che, miscelandosi in proporzioni variabili alle acque del flusso di base, alimentano la portata della sorgente:

- "conduit-flow", nel reticolo di condotti e di fratture di ordine superiore;
- "diffuse-flow", nel reticolo di microfessure e fratture di piccole dimensioni (Shuster & White, 1971).

Le risorse idriche dell'epicarso alimentano il "diffuse-flow", marcando il chimismo in zona satura del flusso di base, allorché mobilizzate da sovrappressioni (pistonaggio) generate dagli afflussi più recenti.

Il terzo evento critico (evento D) registrato durante la fase di ricarica dell'acquifero (Fig. 4.8), presenta andamenti nei parametri chimico-fisici delle acque (conducibilità elettrica, temperatura, pH) confrontabili con l'evento C. Questa evidenza confermerebbe la presenza nell'epicarso, di ulteriori risorse particolarmente mineralizzate, pistonate dalla zona areata verso la sorgente.

4.5.2. II FASE (Novembre 1996)

La seconda fase di ricarica del ciclo idrologico 1996-1997, ha inizio con le precipitazioni registrate nei giorni 17-18 Novembre 1996. Nel periodo in esame (Fig. 4.10) si susseguono tre eventi di flusso critici (eventi A, B, C) con portate di picco rispettivamente di 8,3, 15,1 e 9,2 m³/s. Le precipitazioni che hanno alimentato il sistema, registrate alla stazione Subiaco "S. Scolastica" (511m), sono complessivamente di 350 mm, con intensità massima di 10-12 mm/h. Secondo il modello proposto, in questa fase la dinamica di flusso nel reticolo ipogeo si manifesta con il serbatoio epicarsico sostanzialmente saturo da acque con valori di conducibilità

elettrica, salinità totale e pH sensibilmente maggiori di quelli caratteristici del flusso di base (Fig. 4.4). Questa ipotesi implica che siano state raggiunte condizioni di equilibrio chimico dalla matrice liquida nell'epicarso dopo un periodo di residenza nella roccia serbatoio di circa due mesi (Set. - Nov. 1996).

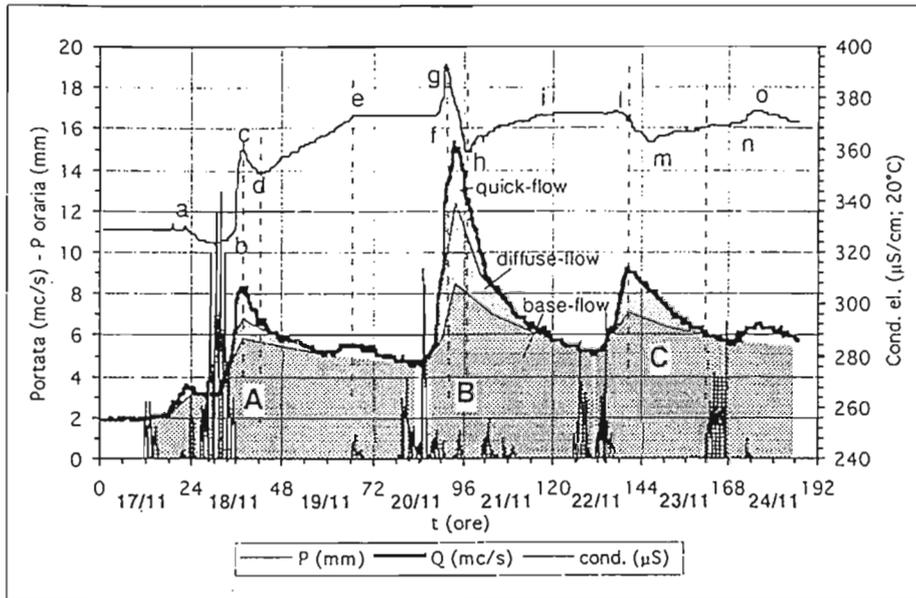


Fig. 4.10 - Sorgente Inferniglio (504 m): idrogramma del periodo 17-24 Novembre 1996 (Eventi A-B-C, II fase). Confronto tra i valori di portata (m^3/s) ed i valori di conducibilità elettrica ($\mu S/cm$, $20^\circ C$) dell'acqua (intervallo di acquisizione dati di 30 minuti).

4.5.2.1. EVENTO A

Il primo evento (A) è caratterizzato da due massimi relativi di portata (3,6 e $8,3 m^3/s$), in rapporto alla distribuzione degli afflussi, frazionati in più scariche di forte intensità (intensità massima registrata $14 mm/h$). A partire dal primo picco di portata (punto "a" in Fig. 4.10) la conducibilità elettrica decresce dal valore che precede l'evento in esame e cioè $330 \mu S/cm$ fino a circa $320 \mu S/cm$. In realtà, da un più accurato esame dell'idrogramma e della curva della conducibilità elettrica, si evidenzia un debole picco di mineralizzazione coincidente con la portata critica, a cui fa seguito il decremento dei valori di conducibilità coerentemente con la curva di scarica (punto "b"). In corrispondenza del secondo picco di piena ($\sim 8 m^3/s$) i valori di conducibilità elettrica subiscono un sensibile incremento fino al massimo di $360 \mu S/cm$, cui segue un brusco decremento in parallelo ^{alla} scarica rapida dei deflussi (dal punto "c" al punto "d"). ← A partire da tale momento (punto "d"), che coincide con la variazione di pendenza della curva dei deflussi, i valori della mineralizzazione subiscono un nuovo incremento che si protrae fino al termine dell'episodio A (punto "e"), in cui ulteriori deboli precipitazioni interrompono l'andamento della curva di decrescita. Dall'andamento del pH, mentre non si rilevano variazioni durante il primo picco di portata (punto "a"), si osserva un sensibile incremento dei valori in

corrispondenza del secondo picco di flusso (punti "b-d"). A tale fase corrisponde anche un aumento dei valori di temperatura della sorgente. Durante la fase di scarica sino al termine dell'episodio, i valori di pH segnano un progressivo decremento parallelamente all'incremento della conducibilità elettrica. In accordo con il modello proposto, sia nel primo che nel secondo picco dell'evento A, le precipitazioni che investono l'area di alimentazione della sorgente Inferniglio, producono (i) il pistonaggio delle risorse idriche dell'epicarso, più superficiali e fortemente mineralizzate, nel sistema di fessure ("diffuse-flow") del serbatoio areato. A tale fase segue (ii) lo svuotamento impulsivo dei macrocondotti, allagati da acque di recentissima infiltrazione ("conduit-flow"), con bassa conducibilità elettrica e bassi valori di pH. L'esaurirsi della scarica rapida dei condotti è segnato (iii) dal contributo delle risorse residue dell'epicarso ("diffuse-flow"). Queste risultano miscelate sia con gli ultimi contributi del flusso veloce nel sistema di condotti, in esaurimento, sia con la matrice del "base-flow" via via maggiormente rappresentata in termini percentuali col procedere dell'evento verso l'esaurimento.

4.5.2.2. EVENTO B

Il secondo evento critico (evento B, Fig. 4.10), dal 20 al 22 Novembre 1996 con portata al picco di circa $15 \text{ m}^3/\text{s}$, conferma quanto osservato in A ed evidenzia, in particolare, il ruolo dell'epicarso nella dinamica di flusso dell'acquifero. In tale evento, il massimo valore di conducibilità registrato precede di circa 2-3 ore la porta critica ($\sim 15 \text{ m}^3/\text{s}$), e coincide col massimo di temperatura ed il minimo di pH dell'acqua (Fig. 4.11). Tale fase viene interpretata come l'arrivo all'emergenza di matrici più mineralizzate residenti nell'acquifero epicarsico e mobilizzate per pistonaggio dalla zona areata del serbatoio. Fa seguito l'allagamento dei condotti maggiori ad opera delle acque di rapida infiltrazione nel sistema di inghiottitoi verso cui converge il reticolo carsico epigeo. La restituzione all'emergenza di tali aliquote si evidenzia con valori di conducibilità elettrica e di pH sensibilmente inferiori alle risorse dell'epicarso. L'esaurimento della curva dei deflussi è caratterizzato dall'effetto di miscelazione della matrice epicarsica nella rete di fessure ("diffuse-flow"), con aliquote via via crescenti di flusso di base.

4.5.2.3. EVENTO C

Il terzo evento (evento C in Fig. 4.10), dal 22 al 24 Novembre 1996, è significativo in quanto apparentemente non evidenzia mobilizzazione di risorse idriche più mineralizzate. E' lecito ipotizzare che tali condizioni indichino un completo rinnovamento delle risorse epicarsiche da parte delle precipitazioni che hanno preceduto l'evento C. Così, le acque che alimentano al picco di portata ($\sim 9 \text{ m}^3/\text{s}$) la sorgente (punto "I" in Fig. 4.10) sono soprattutto rappresentative delle matrici di più recente infiltrazione nell'epicarso, miscelate a quelle proprie del flusso di base. L'incremento nei valori di pH in corrispondenza del picco di piena confermerebbe, in tal modo, la natura recente della acque restituite alla sorgente.

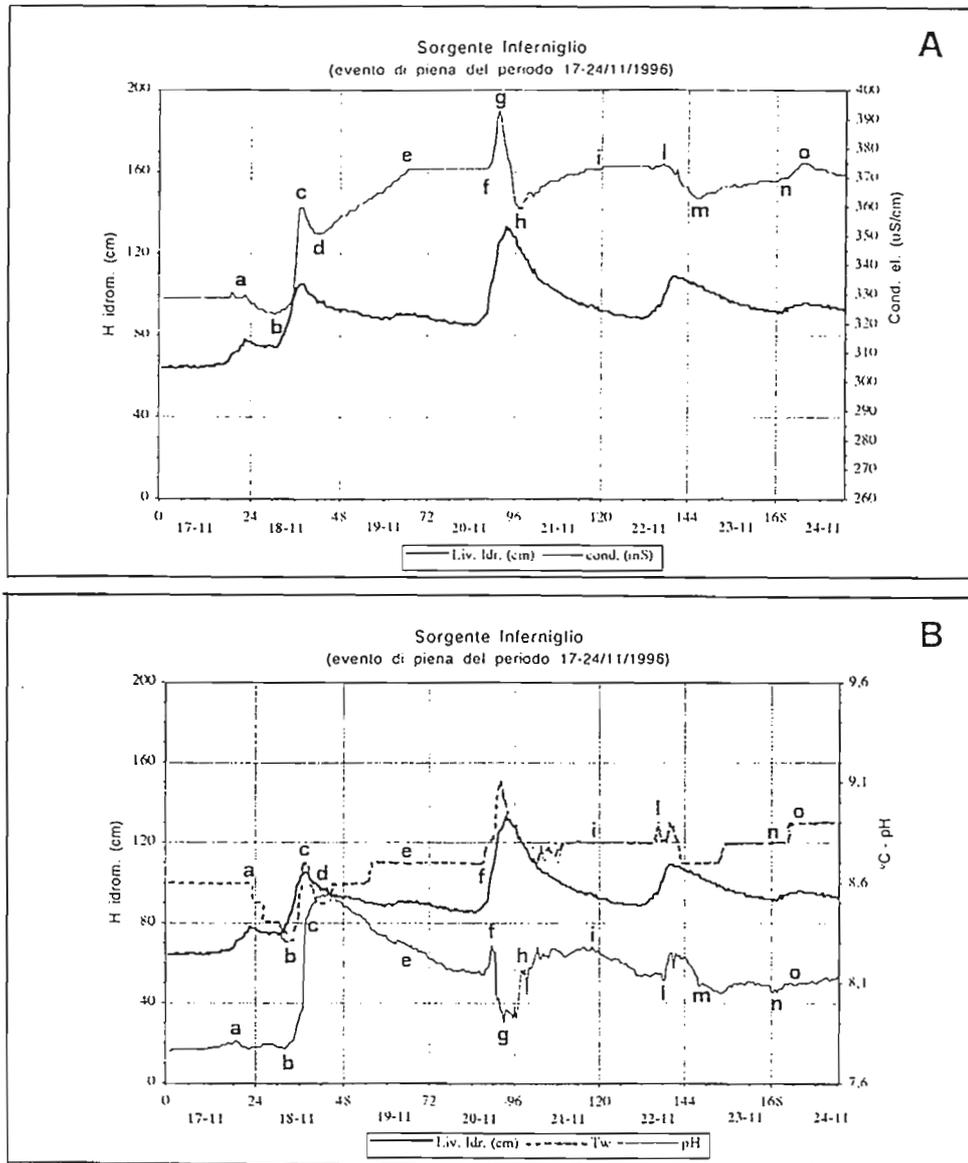


Fig. 4.11 - Sorgente Inferniglio (504 m): idrogramma del periodo 17-24 Novembre 1996 (Eventi A-B-C, II fase). Confronto tra i valori di portata (mc/s) ed i valori di conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C), pH e temperatura ($^\circ\text{C}$) dell'acqua (intervallo di acquisizione dati di 30 minuti).

Al termine dell'evento C (punto "n" in Fig. 4.10), alle precipitazioni registrate alla stazione di Subiaco "Santa Scolastica" (511 m), cui si riferiscono i dati pluviometrici presi in esame, non si osservano variazioni idrodinamiche dell'emergenza confrontabili all'entità degli afflussi, come rilevato in occasione di precipitazioni analoghe per quantità ed intensità. Tale circostanza lascia riflettere sulla validità di porre in relazione eventi caratterizzati da apporti meteorici confrontabili qualitativamente, ma concentrati di volta in volta su areali differenti (conche endoreiche, inghiottitoi oppure versanti con prevalente ruscellamento ecc.). Queste considerazioni vengono generalmente riassunte nell'ammissione di condizioni di particolare eterogeneità ed aleatorietà dei sistemi carsici nel loro complesso (Kozel *et al.*, 1986).

4.5.3. II FASE (Dicembre 1996)

Rientrano nella II fase del ciclo di ricarica del sistema della Sorgente Inferniglio le due piene registrate nel periodo 20-30 Dicembre 1996 (Fig. 4.12), circa 30 giorni dopo gli eventi di flusso occorsi nel mese di Novembre 1996.

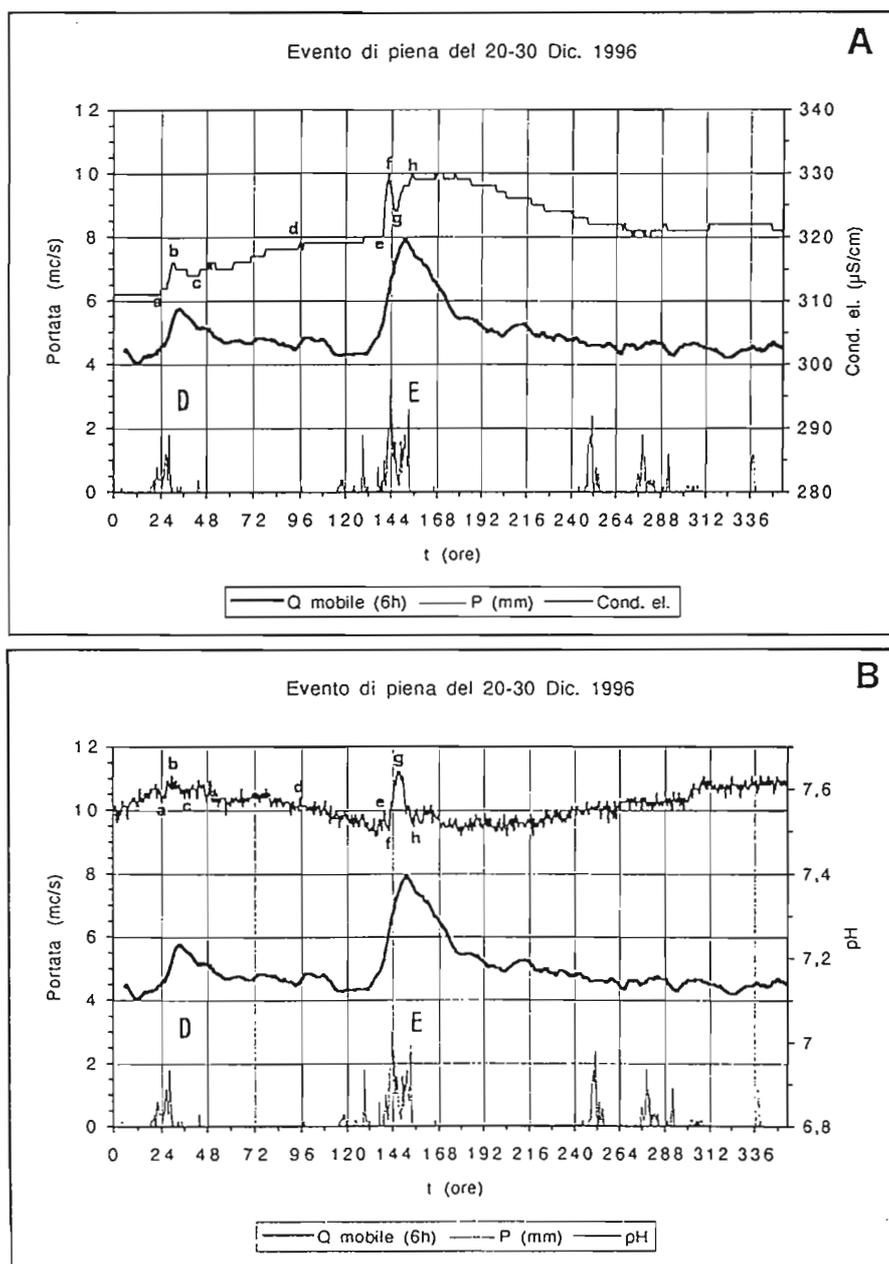


Fig. 4.12 - Sorgente Inferniglio (504 m): idrogramma del periodo 20-30 Dicembre 1996 (Eventi D-E, II fase). Confronto tra i valori di portata (mc/s), conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 20°C) e pH dell'acqua (intervallo di acquisizione dati pari a 30 minuti). Le portate sono espresse come media mobile di un periodo di 6 ore, allo scopo di eliminare le forti oscillazioni semiorarie registrate.

4.5.3.1. EVENTO D

Il primo evento è caratterizzato da un picco di portata di circa 5,8 m³/s e da un debole incremento nei valori di conducibilità elettrica durante la fase di concentrazione di flusso. L'incremento di conducibilità persiste fino al picco di portata (punto "b" in Fig. 4.12). In questo periodo i valori di pH, in aumento nella fase di concentrazione, raggiungono il massimo nell'intorno del colmo di flusso. Durante le prime 6 ore della fase di scarica rapida, diminuiscono i valori di conducibilità elettrica (punto "c"), evidenza che può essere interpretata con lo svuotamento del reticolo di macrocondotti per esaurimento delle acque riferibili al "conduit-flow". Il successivo incremento della mineralizzazione viene interpretata in modo analogo alle considerazioni esposte per gli eventi precedenti.

4.5.3.2. EVENTO E

Durante il secondo evento (23-25 Dicembre 1996) con portata di picco di 8,1 m³/s, si registra al termine della fase di concentrazione un picco della curva di conducibilità elettrica (punti "e-f-g" in Fig. 4.12) riferibile al pistonaggio di acque epicarsiche nella rete di condotti e di fratture, prima dell'arrivo di matrici meno mineralizzate. Al picco di portata (punto "g") si registra il massimo valore di pH ed un marcato flesso nei valori di conducibilità, con variazione dei parametri che si esaurisce nell'arco delle 12 ore a cavallo della fase critica di flusso. A questa fase dovrebbero riferirsi portate della sorgente in cui risultano prevalenti le acque di rapida infiltrazione e di circolazione veloce nel reticolo di condotti, sebbene miscelate a consistenti aliquote di risorse presenti nell'epicarso. Queste ultime derivano verosimilmente dalle precipitazioni di Novembre, ed in parte dalle piogge del periodo 19-20 Dicembre 1996 (evento D). A conferma di quanto ipotizzato si segnala il progressivo aumento dei valori di conducibilità elettrica durante la crescita e la scarica rapida dell'evento in esame e la graduale diminuzione dei valori nella fase di esaurimento, con percentuale progressivamente crescente di contributi del flusso di base. Alla fase di decrescita del flusso, si associa la diminuzione dei valori di pH, che evidenzia il perdurare di condizioni di aggressività delle risorse epicarsiche, recentemente rinnovate. Il picco nei valori di pH registrato al colmo di piena (punto "g", Fig. 4.12) in questo modello interpretativo risulta anomalo in quanto riferibile a matrici con prevalente flusso rapido nel reticolo di carsico di condotti.

4.5.4. III FASE (Febbraio 1997)

La fase finale del ciclo di ricarica invernale è rappresentata dall'evento critico registrato nei giorni 14-17 Febbraio 1997 (Fig. 4.13). Tale evento segue quelli di Dicembre 1996 di circa 6 settimane. In questo periodo aliquote di risorse epicarsiche hanno alimentato assieme al flusso di base la portata della Sorgente Inferniglio, come si desume dalle caratteristiche chimico-fisiche delle acque che evolvono verso una maggiore mineralizzazione e verso la saturazione nei

confronti della calcite. L'evento del 14-17 Febbraio 1997 (Fig. 4.13) non sembra mobilizzare nell'epicarso matrici mineralizzate, come evidenzia l'andamento decrescente dei valori di conducibilità elettrica.

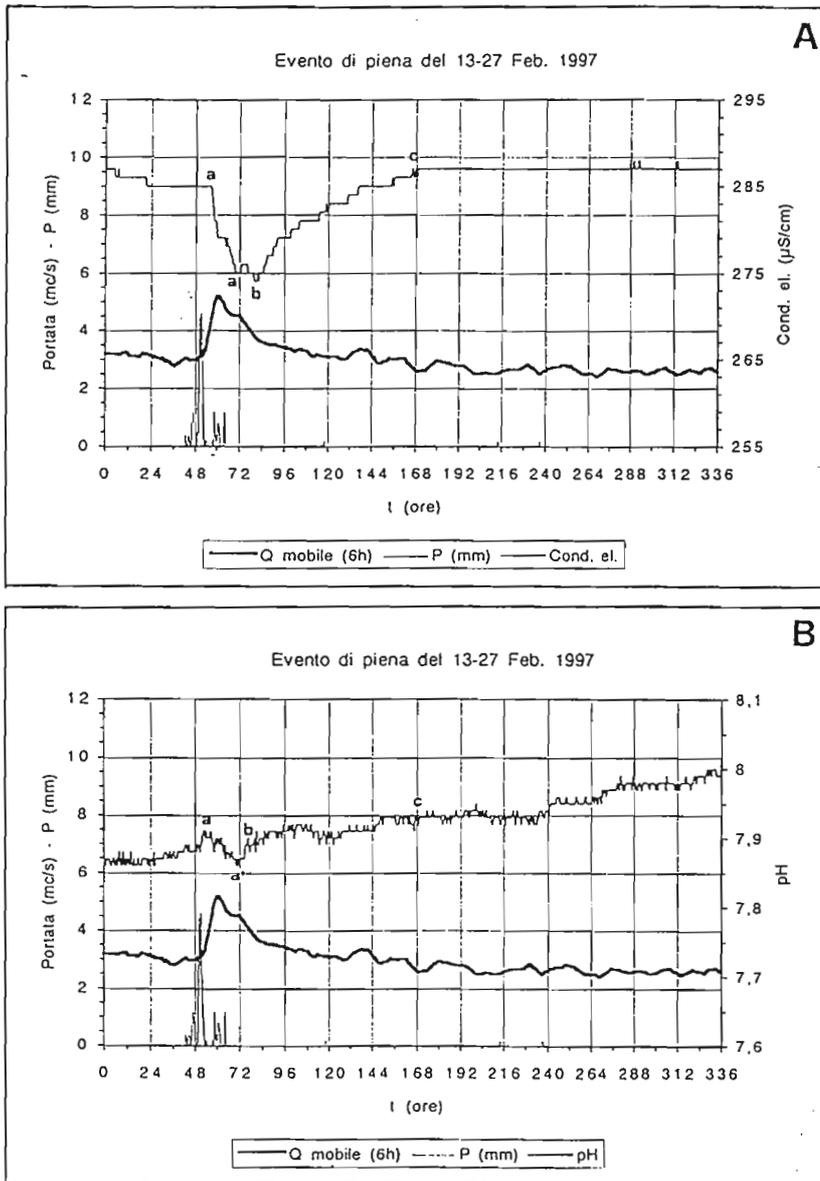


Fig. 4.13 - Sorgente Inferniglio (504 m): idrogramma del periodo 13-27 Febbraio 1997 (III fase). Confronto tra i valori di portata (mc/s), di conducibilità elettrica ($\mu\text{S/cm}$, 20°C) e pH dell'acqua (intervallo di acquisizione dati pari a 30 minuti). Le portate sono espresse come media mobile di un periodo di 6 ore.

In particolare, la portata al colmo della fase di flusso ($\sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$) deriva prevalentemente da matrici canalizzate nella rete di condotti ("quick-flow") fino al termine della scarica rapida (Fig. 4.13, punto "b"). Successivamente, l'incremento nei valori della mineralizzazione (punti "b-c") segna la variazione del rapporto di miscelazione tra le acque di circolazione veloce ("quick-flow"), via via in esaurimento, sia del "diffuse-flow" che del "base-flow", prevalente a partire dal punto "c". Le variazioni di pH mostrano, tuttavia, il picco dei valori all'inizio della fase di concentrazione del flusso di piena. Al massimo di pH segue il decremento dei valori fino al minimo coincidente con il picco di portata ($\sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$). In analogia al modello idrodinamico proposto, questo comportamento può derivare dalla mobilitazione di risorse epicarsiche nella fase che precede la scarica rapida ("quick-flow") nel reticolo di macrocondotti.

In termini di variazione della mineralizzazione delle acque sorgentizie, tale andamento potrebbe correlarsi a limitati effetti della pressione (pistonaggio) esercitata dagli apporti esterni sulle matrici dell'epicarso, con riflessi sui rapporti di miscelazione tra le diverse componenti che alimentano la portata della sorgente. Le precipitazioni che hanno generato l'evento in esame risultano, infatti, di minore entità e di scarsa intensità (max 3 mm/h), se confrontate con quelle che hanno caratterizzato i precedenti episodi di piena. Si precisa, tuttavia, che le limitate portate di picco raggiunte non sempre paiono sufficienti a mobilitare matrici più mineralizzate dall'epicarso verso la sorgente.

4.7. Considerazioni conclusive

Le analisi delle serie cronologiche di dati sia idrologici che chimico-fisici delle acque della Sorgente Inferniglio consentono di migliorare il quadro delle conoscenze sulla dinamica di circolazione in mezzi fessurati e carsificati. Il programma di ricerca avviato con continuità nelle osservazioni di campo a partire dal 1991, si avvale attualmente delle serie cronologiche registrate con cadenza semioraria alla centralina di acquisizione 'Inferniglio' (Fig. 4.2).

Il confronto tra le serie idrologiche e quelle chimico-fisiche riferite ad eventi di flusso critici, consente di identificare tre matrici liquide (*end-members*) che partecipano con contributi variabili alla formazione della portata della sorgente. Tali matrici vengono riconosciute in:

- acque di rapida infiltrazione nel reticolo di macrocondotti e diaclasi convergenti all'emergenza ("quickflow");
- risorse dell'epicarso, maggiormente mineralizzate, che alimentano il reticolo anastomizzato di fessure che si sviluppa nella zona areata ("diffuseflow");
- flusso nel reticolo di fessure e nei grandi condotti allagati della zona satura ("baseflow").

Le risorse idriche dell'epicarso svolgono un rilevante ruolo nella caratterizzazione chimica delle acque restituite dall'emergenza (Klimchouk, 1995; Williams, 1983; Shuster and White, 1971). In particolare, nelle condizioni di saturazione del serbatoio sospeso, tali riserve possono essere

"pistonate" verso l'emergenza al termine della fase di concentrazione del flusso di piena e precedere così il culmine della fase parossistica. Al tale fase corrisponde nel sistema in esame l'attivazione del condotto carsico sospeso ("Grotta Inferniglio") per valori di portata maggiori di $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Al termine dello svuotamento rapido dei macrocondotti del sistema ("quickflow"), diventa nuovamente prevalente il contributo delle acque più mineralizzate che derivano da "diffuseflow", il cui segnale chimico risulta obliterato al picco di piena. Da questo momento senza soluzione di continuità si passa da un flusso diffuso attraverso il reticolo di fratture e fessure della zona areata ("diffuseflow") all'alimentazione attraverso il reticolo di fessure e di condotti della zona satura presenti nel serbatoio carsico ("baseflow"). Pertanto la fase di esaurimento del flusso di piena/morbida è sostenuto quasi esclusivamente (99%) dalle matrici riferibili al "baseflow".

5

Processi di precipitazione di CaCO_3 alla sorgente Tartare (Monti Simbruini): misure di campo e simulazioni di laboratorio.

5.1. Introduzione

La sorgente Tartare è ubicata nei pressi del Fiume Aniene, alla quota di 568 m (Fig. 5.1). L'emergenza alimenta un ruscello che raggiunge l'Aniene in riva sinistra, dopo circa 100 m (dislivello 15 m) formando una serie di piccole cascate e vistosi depositi di travertino. Dalla degassazione di CO_2 , le acque del torrente risultano sovrasature rispetto alla calcite, con decremento della concentrazione di Ca^{2+} , da monte verso valle. Il chimismo delle acque, pur non variando in misura rilevante dalla sorgente al fiume, evidenzia tuttavia variazioni nei principali parametri chimico-fisici (pH, conducibilità elettrica, conc. ione Ca^{2+} , indice di saturazione della calcite, press. parziale di CO_2). Il controllo sperimentale dei processi di precipitazione è stato condotto mediante immersione in acqua di placchette di calcite ($3 \times 3 \times 0,3$ cm ca.) durante due campagne di misure, della durata di 67 e 5 giorni ciascuna (Sett-Nov 1995 e Maggio 1997, rispettivamente). Al termine del periodo di stazionamento in sito, gli incrementi in peso dei campioni per deposizione di calcite sono stati tradotti in 'tasso di precipitazione' espresso in $\text{mmol}_{(\text{CaCO}_3)} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Le placchette sono state immerse in siti dell'alveo caratterizzati sia da flusso turbolento sia da flusso lento, apparentemente laminare, con lo scopo di valutare il controllo esercitato dai fattori idrodinamici del sistema sui processi di deposizione del CaCO_3 .

I valori del 'tasso di precipitazione sperimentale' sono stati messi a confronto con quelli teorici derivati dall'equazione di Plummer *et al.* (1978), corretti sulla base del modello di deposizione di Buhmann & Dreybrodt (1985a, b), Dreybrodt & Buhmann (1991), Dreybrodt (1992) che tiene conto dell'esistenza della *superficie-limite*, di spessore ϵ , tra la fase liquida e quella solida. Si precisa che i valori teorici sono desunti a partire dalla composizione chimica della fase liquida nei diversi siti considerati. I valori teorici calcolati risultano superiori di un ordine di grandezza (fattore 10) rispetto a quelli sperimentali. Presso l'Istituto di Fisica Sperimentale (Università di Brema), sono stati simulati i processi di precipitazione del CaCO_3 da soluzioni sovrasature con analoghe caratteristiche chimico-fisiche delle acque della sorgente Tartare. I risultati delle simulazioni di laboratorio (su sistemi chiusi) confermano quelli teorici calcolati sul modello di Dreybrodt & Buhmann (1991), rilevandosi superiori a quelli sperimentali di circa un ordine di grandezza.

← [u]

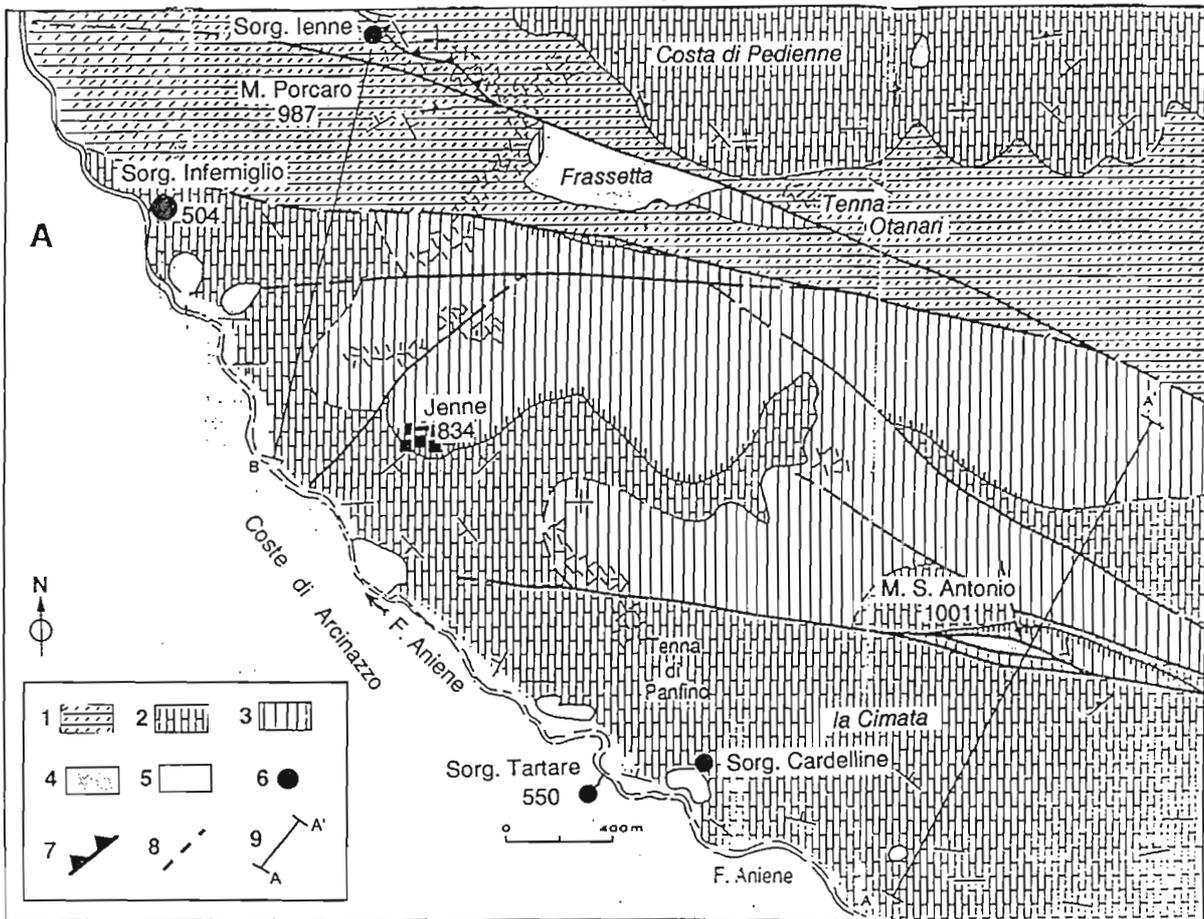
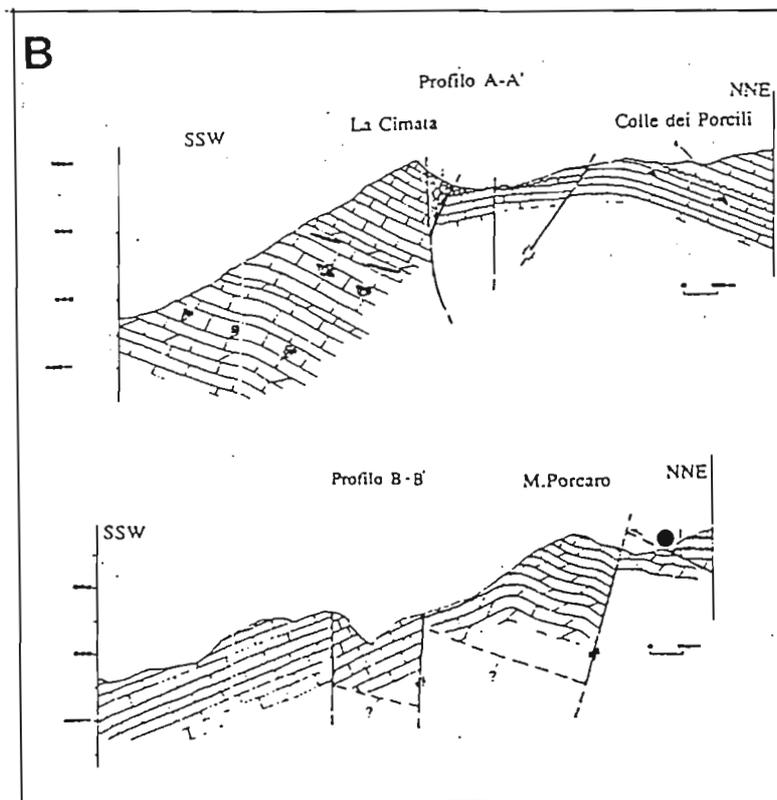


Fig. 5.1 - Ubicazione della sorgente Tartare. Legenda: 1) Dolomie e calcari dolomitici (Cenomaniano p.p.); 2) Calcari a rudiste (Maastrichtiano (?), Senoniano-Turoniano); 3) 'Calcari a Briozoi e Litotamni' *Auctt.* (Serravalliano p.p.-Langhiano p.p.); 4) depositi terrigeni (Miocene superiore s.l.); 5) coperture eluviali, residuali e detritiche (Quaternario); 6) sorgenti localizzate (La sorgente "Ienne", alimentata da una falda epicarsica (prof. B-B') è a quota 825 m); 7) retroaccavallamento (M. Porcaro); 8) Faglia (a tratteggio se ipotizzata); 9) traccia delle sezioni geologiche. (Da Parotto M., Tallini M. & Tozzi M. - 1990)



Spiegazioni in grado di giustificare lo scarto tra i valori sperimentali e teorici vanno ricercate (i) nei processi di inibizione della precipitazione del carbonato di calcio da parte dello ione Mg^{2+} o da parte dello ione fosfato (Michaelis *et al.*, 1984), (ii) controllo esercitato dagli organismi vegetali, (iii) controllo batterico dei processi di deposizione della calcite. A queste considerazioni va aggiunto, tuttavia, che la presenza di alghe e piante può costituire un fattore catalizzatore nei processi di deposizione chimica, sottraendo CO_2 al sistema naturale (Bayari & Kurttas, 1995).

5.2. Lavori precedenti

Numerosi Autori si sono occupati dei processi di precipitazione (e dissoluzione) inorganica del carbonato di calcio da soluzioni sovrasature, sia attraverso metodiche sperimentali applicate sul campo (Dreybrodt *et al.*, 1992; Bayari & Kurttas, 1996; Hermann & Lorah, 1988; Zaihua *et al.*, 1995; Zhnang *et al.*, 1995), sia attraverso previsioni teoriche su modelli geochimici sviluppati in laboratorio (Buhmann & Dreybrodt, 1985a, b; 1987; Baumann *et al.*, 1985; Dreybrodt, 1988; Dreybrodt, 1981; Dreybrodt & Buhmann, 1991). In particolare, Plummer *et al.* (1978) forniscono una equazione che descrive i processi di dissoluzione e di precipitazione della calcite ('PWP' eq.) sulla base della conoscenza di tre reazioni parallele che possono essere calcolate se è noto il chimismo della soluzione a contatto con la fase solida:

$$R_{\text{pwp}} = \chi_1(\text{H}^+) + \chi_2(\text{HCO}_3^*) + \chi_3 - \chi_4(\text{Ca}^{++})(\text{HCO}_3^-) \quad (\text{PWP eq.})$$

in cui χ_1, χ_2, χ_3 rappresentano costanti dipendenti dalla temperatura della reazione, mentre χ_4 dipende anche dalla attività ionica del (HCO_3^*) ; R_{pwp} corrisponde al 'tasso' (*Rate*) di precipitazione-dissoluzione di CaCO_3 .

Tale modello non tiene conto delle reazioni chimico-fisiche che avvengono alla superficie di contatto liquido-solido (di spessore variabile ϵ), ampiamente discusse, invece, in una serie di lavori di Buhmann & Dreybrodt (1985a, b), Dreybrodt (1988) e Dreybrodt & Buhmann (1991). In tal modo il chimismo della soluzione liquida e soprattutto la cinetica chimica che in essa si sviluppa risulta differente da quella che avviene alla superficie-limite solido/liquido. Sulla base dei lavori sia teorici che sperimentali, gli Autori propongono un modello dal quale la precipitazione del carbonato di calcio da soluzioni sovrasature può essere stimata se ne è nota la composizione chimico-fisica. Così, sulla base del trasporto molecolare per diffusione alla superficie-limite, viene corretta dagli Autori l'equazione PWP (Plummer *et al.*, 1978) allo scopo di fornire valori del tasso di precipitazione (R) maggiormente in accordo con le condizioni reali, misurate sul campo o simulate in laboratorio. L'equazione fornita dagli autori viene espressa nella forma

$$R = \alpha ([\text{Ca}^{2+}]_{\text{eq}} - [\text{Ca}^{2+}])$$

in cui α è una costante di precipitazione che dipende dalla pressione parziale di CO_2 nella soluzione, dalla temperatura e dallo spessore ϵ della superficie-limite, e $[\text{Ca}^{2+}]_{\text{meq}}$ è la concentrazione dello ione Ca alla saturazione. ← 

Inoltre, a parità della composizione chimica della soluzione sovrasatura, le condizioni idrodinamiche del sistema (dinamica di flusso e, in conseguenza, spessore ϵ della superficie-limite) possono determinare variazioni del tasso pari circa a un ordine di grandezza.

Le sperimentazioni di campagna condotte da Dreybrodt *et al.* (1992) e Zaihua *et al.* (1995), con misure dirette della precipitazione di calcite su tavolette di marmo, hanno suggerito di applicare la metodologia in altri siti geografici, con lo scopo di confrontare i risultati riferiti a situazioni ambientali, idrogeologiche ed idrochimiche differenti.

Nei lavori citati gli Autori misurano l'entità di precipitazione attraverso la variazione in peso di campioni di marmo (Carrara) immersi in acqua per alcuni giorni e ne confrontano i valori con quelli teorici, calcolati con l'equazione di Plummer *et al.* (1978) sulla base del chimismo delle acque. Questi ultimi risultano superiori ai primi di un ordine di grandezza (Dreybrodt *et al.*, 1992), mentre operando la correzione della citata equazione attraverso il modello che tiene conto del trasporto di massa attraverso la superficie-limite (Dreybrodt & Buhmann, 1991), con ϵ compreso tra 10^{-4} e 10^{-2} cm, si ottiene un migliore accordo tra i risultati (sperimentali e teorici), con scarto tra i valori pari ad un fattore due. Lo spessore della superficie-limite ϵ dipende dalle condizioni di flusso del sistema, mentre viene rilevato un decremento del tasso di precipitazione con l'aumentare di ϵ . Attraverso una serie di campagne sperimentali sulle sorgenti Huanglong (Cina), Zaihua *et al.* (1995) giungono alla conclusione che una buona previsione del tasso di precipitazione può essere effettuata riducendo di un fattore di circa 10 i valori calcolati con l'equazione PWP, sulla base dei dati di chimismo delle acque, in modo da tenere conto dell'influenza della diffusione molecolare attraverso la superficie-limite tra la fase solida e quella liquida. Lo scarto tra i valori sperimentali e quelli calcolati che comunque si osserva (pari ad un fattore ~ 2), viene imputato dagli Autori a fenomeni di inibizione della precipitazione non rilevabili dalla analisi chimica delle acque. La presenza dello ione Mg^{++} è in grado di ridurre fino ad un ordine di grandezza il tasso di deposizione di calcite (cfr. Reddy, 1986). L'inibizione può derivare anche dalla presenza di fosfati nelle acque oltre che dal controllo esercitato dagli organismi vegetali (Bayari & Kurtas, 1996).

Hermann & Lorah (1988) valutano il tasso di precipitazione del carbonato di calcio in acque superficiali (Virginia, USA) attraverso misure del decremento della concentrazione dello ione Ca^{++} tra due sezioni fluviali contigue. Dalla misura di portata viene successivamente ricavata una stima della precipitazione per litro d'acqua, espressa come tasso di precipitazione sulla

superficie del letto fluviale (approssimativamente valutata). I valori ricavati risultano confrontabili con quelli calcolati con l'equazione PWP a meno di un fattore 2.

Secondo lo stesso principio, Bono & Percopo (1995) valutano il tasso di dissoluzione del carbonato di calcio nell'areale corrispondente al bacino dell'alto Aniene (Monti Simbruini), con misure sperimentali della concentrazione di Ca^{++} nelle acque in uscita dal sistema, in rapporto alla portata totale misurata. Viene ricavata una stima del CaCO_3 portato in soluzione dal sistema carsico, espressa in $\text{meq}(\text{Ca}) \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, rappresentativa delle condizioni naturali di erosione per dissoluzione.

5.3. Descrizione del metodo

La sorgente Tartare, ubicata nel cuore dei Monti Simbruini alla quota di 568 m (Fig. 5.1), è alimentata da un'area di infiltrazione di circa 10 km^2 che si apre in litologie prevalentemente calcaree di di piattaforma interna (Altipiani di Arcinazzo). Lungo il breve fosso che si genera dalla sorgente fino al fiume Aniene (circa 100 m per un dislivello di 15 m), sono presenti depositi di travertino che formano piccole vasche e cascate dell'altezza di qualche metro (Fig. 5.2). A causa della degassazione della CO_2 atmosferica, variano, da monte verso valle, i principali parametri chimico-fisici delle acque (pH, conducibilità elettrica) sovrasature rispetto alla calcite, e decresce la concentrazione dello ione Ca^{++} per precipitazione di carbonato di calcio.

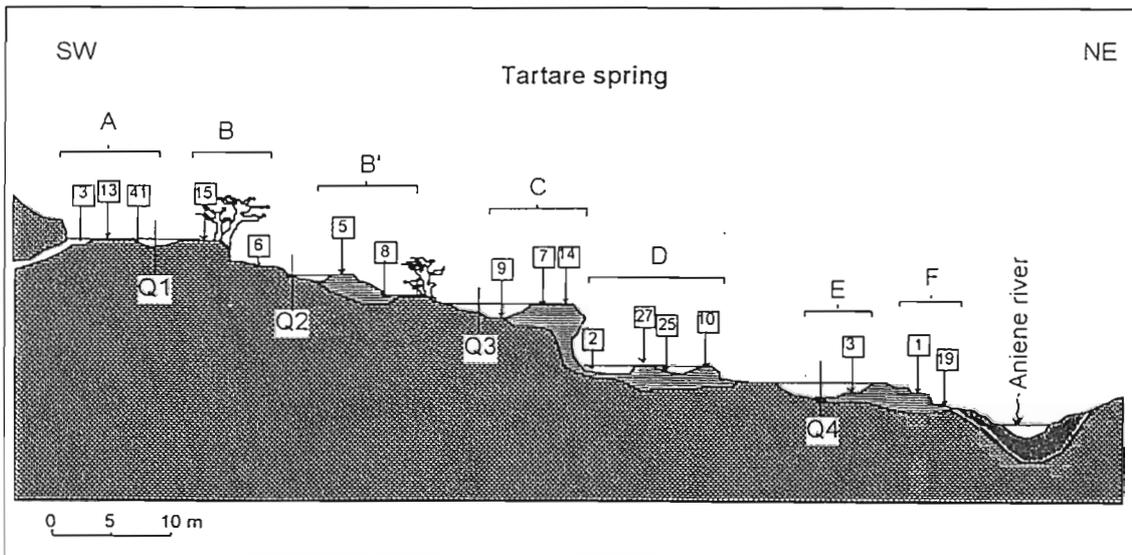


Fig. 5.2 - Profilo longitudinale schematico del Torrente Tartare, dalla sorgente (568 m s.l.m.) al Fiume Aniene (550 m s.l.m.). I quadrati numerati sono indicativi dell'ubicazione delle placchette di marmo, relativamente alla campagna di misure del 3-8 Maggio 1997. Q1-Q4 rappresentano le sezioni di misura della portata in alveo.

Nei periodi 22/09-28/11/1995 e 3-8 Maggio 1997 (67 e 5 giorni) sono state condotte due campagne di misura dei processi di precipitazione del carbonato di calcio *in situ*, con

immersione in alveo di placchette di marmo ($3 \times 3 \times 0,3$ cm) con *superficie geometrica* (Zaihua *et al.*, 1995) di $21,6 \text{ cm}^2$ (Fig. 5.3), secondo il metodo proposto da Dreybrodt *et al.* (1992) e Zaihua *et al.* (1995).

Tale metodo consiste nella misura dell'incremento in peso delle placchette campione, dovuto a incrostazione di CaCO_3 , allo scopo di calcolare il 'tasso di precipitazione diretto'. Le placchette sono state ubicate in sette siti distribuiti omogeneamente da monte verso valle lungo 100 m di alveo (siti A - F; Fig. 5.2). In ogni sito i campioni di riferimento sono stati posti sia in corrispondenza delle condizioni di flusso più critiche (*dighe*: moto turbolento, con velocità di flusso paria a 1 - 2 m/s) sia nelle *vasche* caratterizzate da flusso lento delle acque (5-10 cm/s), allo scopo di valutare l'influenza dell'idrodinamica sugli equilibri del CaCO_3 .

Sono state condotte in ciascuna stazione determinazioni dei principali parametri chimico-fisici e idrodinamici delle acque (Tab. 5.1, 5.2) mentre alla sorgente (sito A), in prossimità del Fiume Aniene (sito F) ed in una stazione intermedia (sito C) sono stati prelevati campioni per analisi chimiche complete (Tab. 5.3).

Si precisa che i valori di temperatura, pH, conducibilità elettrica e della concentrazione dello ione bicarbonato, sono stati misurati direttamente *in situ*, all'atto del prelievo dei campioni per le analisi chimiche di laboratorio (Ca, Mg, SO_4 , Cl), e tre volte al giorno durante lo svolgimento della sperimentazione di campo del periodo 5-8 Maggio 1997 (5 giorni). I valori dell'indice di saturazione rispetto alla calcite e alla dolomite, della pressione parziale di CO_2 e dell'attività ionica delle diverse specie chimiche sono stati calcolati mediante SOL.MIN.EQ. 88 (Kharaka *et al.*, 1988) sulla base delle determinazioni chimico-fisiche sperimentali. Il 'tasso di precipitazione sperimentale' è stato calcolato sulla base dell'incremento in peso delle placchette, sulla *superficie effettiva* (Zaihua *et al.*, 1995) delle stesse per il tempo totale di immersione

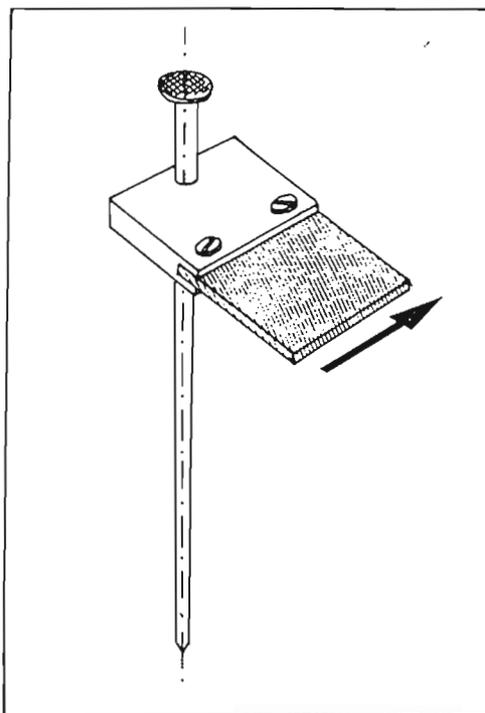


Fig. 5.3 - Schema del sistema impiegato per posizionare in alveo i campioni di marmo per gli esperimenti di precipitazione. La freccia indica la direzione di flusso idrico rispetto alla placchetta.

($\text{mmol}(\text{CaCO}_3)\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), mentre quello teorico ("Buhmann" in Tab. 5.1 e 5.2) è stato calcolato secondo il modello proposto da Dreybrodt & Buhmann (1991), considerando lo spessore medio della superficie-limite ϵ pari a 1 cm nelle condizioni di flusso turbolento. La *superficie effettiva* delle placchette viene valutata pari a circa 4 volte quella geometrica.

Sorgente Tartare
campagna di misure del periodo 22/09/95-28/11/95 (tempo di permanenza in sito: 67 giorni)

sito di marmo (n.)	tavoletta (n.)	ubicazione*	T acqua (°C)	pH	Cond. el. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	portata (mc/s)	velocità di flusso (cm/s)	Ca ⁺⁺ (mmol/l)	Mg ⁺⁺ (mmol/l)	HCO ₃ ⁻ (mmol/l)
A	33	vasca	11,5	7,48	398		1	2,085	0,22	4,62
B	15	vasca	11,5	7,9	398		5	2,085	0,22	4,62
B'	14		11,5	7,9	395		3	2,085	0,22	4,62
C	30	diga	11,3	7,9	395		15	2,06	0,23	4,55
D	12	cascata	11,3	8,02	393		85	2,06	0,23	4,55
E	13	diga	11,3	8,02	393		25	2,06	0,23	4,55
F	11	diga	11,3	8,02	393	0,057	62	2,03	0,125	4,45

sito di marmo (n.)	tavoletta (n.)	ubicazione*	S.I. CaCO ₃ ($\log \text{AP}/\text{KT}$)	S.I. CaMg(CO ₃) ₂ ($\log \text{AP}/\text{KT}$)	pCO ₂ ($\text{atm} \times 10^{-3}$)	precipitaz. sperim. (tav.) ($\text{mmol}/\text{cm}^2\text{s}$)	precipitaz. calc. (Buhmann) ($\text{mmol}/\text{cm}^2\text{s}$)	Δ (peso) (mg)
A	33	vasca	0,195	-0,025	2,51	0	$12,5 \times 10^{-8}$	-1,3
B	15	vasca	0,25	0,135	2,23	0	$15,3 \times 10^{-8}$	-3,5
B'	14		0,25	0,135	2,23	0	$18,5 \times 10^{-8}$	-7,66
C	30	diga	0,25	0,135	2,23	$0,23 \times 10^{-8}$	$16,7 \times 10^{-8}$	115,6
D	12	cascata	0,63	0,35	1,23	$0,511 \times 10^{-8}$	$21,5 \times 10^{-8}$	256
E	13	diga	0,63	0,35		$0,167 \times 10^{-8}$	$23,6 \times 10^{-8}$	83,6
F	11	diga	0,78	0,42	0,86	$0,36 \times 10^{-8}$	$26,8 \times 10^{-8}$	180,8

Tab. 5.1 - Campagna di sperimentazione del periodo 22/09-28/11/1995 (67 giorni). Principali parametri chimico-fisici e chimici delle acque del Torrente Tartare.

In ogni sito sono state immerse più placchette per una verifica dei valori ottenuti, in termini di differenze in peso. Si precisa che non si è mai verificata la circostanza di valori differenti per campioni posizionati in coppia. Ogni placchetta è stata pesata (con precisione del milligrammo), poco prima dell'immersione in alveo, dopo essiccazione in forno per due ore a circa 80°C. Dopo l'immersione, esse sono pesate dopo essiccazione di due ore (80°C), quindi pesate nuovamente dopo un periodo di circa 6 ore a 150°C, allo scopo di eliminare la frazione organica. La differenza in peso tra l'ultima pesata e quella precedente l'immersione fornisce la quantità di calcite deposta per precipitazione. L'analisi dei cristalli neoformati, effettuata con microscopio a scansione elettronica (SEM) e tramite diffrattometria, ne ha rilevato la natura confermando la genesi primaria del minerale.

5.3.1. Risultati e discussione dei dati

Durante le campagne condotte alla sorgente Tartare (Set.-Nov. 1995, Tab. 5.1; 5-8 Maggio 1997, Tab. 5.2) sono state osservate variazioni nei principali parametri chimico-fisici,

qualitativamente confrontabili, da monte (all'emergenza) a valle lungo il rivo perenne che raggiunge il Fiume Aniene.

Sorgente Tartare
campagna di misure del periodo 3-8/5/1997

sito	tavoletta di marmo (n.)	ubicazione*	T acqua (°C)	pH	Cond. el. (µS/cm)	portata (mc/s)	velocità di flusso (cm/s)	Ca++ (mmol/l)	Mg++ (mmol/l)	HCO ₃ - (mmol/l)
A	3	vasca	11,2	7,95	375	0,08	5	1,605	0,19	3,85
	13	vasca					3,2			
B	6	vasca	11,2	7,9	375	0,09	6	1,61	0,19	3,84
	15	diga					4,3			
B'	5	vasca	11,3	8,05	372		8	1,6	0,2	3,77
	8	diga					5,3			
C	9	diga	11,1	8,11	370	0,07	9,1	1,59	0,2	3,72
	7	vasca					4,3			
	14	diga					18,4			
D	10	cascata	11,2	8,23	368			1,59	0,19	3,7
	25	cascata								
	27	diga					15,6			
E	3	vasca	11,1	8,3	368	0,07	13	1,58	0,185	3,65
F	1	diga	11,2	8,38	366		4,5	1,58	0,185	3,62
	19	diga					18,5			

sito	tavoletta di marmo (n.)	ubicazione*	S.I. CaCO ₃ (log AP/KT)	S.I. CaMg(CO ₃) ₂ (log AP/KT)	pCO ₂ (atm x 10 ⁻³)	precipitaz. sperim. (tav.) (mmol/cm ² s)	precipitaz. calc. (Buhmann) (mmol/cm ² s)	Δ (peso) (mg)
A	3	vasca	0,48	-0,035	2,21	0,011 x 10 ⁻³	8,4 x 10 ⁻⁶	0,4
	13	vasca				0,005 x 10 ⁻³		0,2
B	6	vasca	0,44	-0,128	2,46	0,005 x 10 ⁻³	6,2 x 10 ⁻⁶	0,2
	15	diga				0		0,1
B'	5	vasca	0,57	0,125	1,62	0,169 x 10 ⁻³	11,7 x 10 ⁻⁶	6,3
	8	diga				0,225 x 10 ⁻³		8,4
C	9	diga	0,65	0,266	1,36	0,455 x 10 ⁻³	13,3 x 10 ⁻⁶	17,5
	7	vasca				0,279 x 10 ⁻³		10,4
	14	diga				1,013 x 10 ⁻³		3,8
D	10	cascata	0,75	0,448	1,07	0,734 x 10 ⁻³	16,7 x 10 ⁻⁶	27,4
	25	cascata				0,814 x 10 ⁻³		54,7
	27	diga				1,466 x 10 ⁻³		30,4
E	3	vasca	0,85	0,668	0,79	0,595 x 10 ⁻³	21,8 x 10 ⁻⁶	22,2
F	1	diga	0,88	0,72	0,73	1,243 x 10 ⁻³	22,6 x 10 ⁻⁶	46,4
	19	diga				1,447 x 10 ⁻³		5,4

Tab. 5.2 - Campagna di sperimentazione del periodo 3-8/05/1997 (5 giorni). Principali parametri chimico-fisici e chimici delle acque del Torrente Tartare.

I risultati delle determinazioni di campo e di laboratorio sono riportati nelle tabelle 5.1 e 5.2 e nelle figure 5.4 e 5.5. In tali grafici (Fig. 5.4E, 5.5E) sono riportati, inoltre, i valori del tasso di precipitazione sia sperimentale (desunto dall'incremento in peso delle placchette di marmo) sia teorico, calcolato secondo il modello proposto da Dreybrodt & Buhmann (1991), con spessore della superficie-limite ϵ pari a 1 cm (flusso turbolento; Fig. 5.6).

Sorgente Tartare
caratteri chimico-fisici medi delle acque (periodo Aprile - Maggio 1997)

sito	quota	portata	T acqua	pH	Cond. el.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺
	(m)	(mc/s)	(°C)		(mS/cm)	(mmol/l)	(mmol/l)	(mmol/l)	(mmol/l)
A	568	0,08	11,1	7,9	373	1,85	0,19	0,27	0,02
C	560	0,07	11,1	8,05	370	1,78	0,19	0,27	0,02
F	550	0,075	11,2	8,26	3,62	1,66	0,18	0,27	0,02

sito	quota	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	S.l. CaCO ₃	S.l. CaMg(CO ₃) ₂	pCO ₂
	(m)	(mmol/l)	(mmol/l)	(mmol/l)	(mmol/l)	(log AP/KT)	(log AP/KT)	(atm x 10 ⁻³)
A	568	4,05	0,14	0,052	0,065	0,447	-0,27	3,05
C	560	4,03	0,138	0,051	0,062	0,759	0,382	1,95
F	550	3,98	0,135	0,051	0,062	0,518	0,486	1,25

Tab. 5.3 - Composizione chimica delle acque della Sorgente Tartare e dell'omonimo torrente, fino alla confluenza con il Fiume Aniene (valori medi del periodo Aprile-Maggio 1997).

La composizione chimica delle acque riferita a tre siti ubicati lungo il torrente (siti A, C ed F, Fig. 5.2) è tipicamente bicarbonato-calcica, senza sostanziali variazioni nelle concentrazioni dei principali costituenti chimici da monte verso valle.

Durante la prima campagna (1995) della durata di 67 giorni di immersione dei campioni (Fig. 5.4), sono state condotte determinazioni sul chimismo delle acque limitatamente ai siti A, C ed F, mentre un più completo esame idrochimico è stato associato alla seconda serie di misure (5 giorni, Fig. 5.5), con determinazioni complete nei sette siti considerati. Dato il buon accordo qualitativo tra i risultati riferiti alle due campagne e la maggiore frequenza nelle determinazioni condotte nell'ultima, la discussione sui dati acquisiti fa riferimento a tale periodo (5 giorni), sottolineando la sostanziale uniformità quantitativa nei valori di precipitazione riferiti allo stesso sito di stazionamento sia per il lungo che per il breve termine.

Procedendo dalla sorgente (sito A) verso valle, si registra l'incremento nei valori medi di pH, da circa 7,9 fino a 8,38 unità (Tab. 5.2). Tale comportamento deriva dalla degassazione di CO₂, la cui pressione parziale in soluzione varia da 0,0021 atm, alla sorgente, fino a 0,00073 atm in prossimità della confluenza del rivo con il Fiume Aniene (sito F). In particolare, le maggiori variazioni di pH (sulla base delle quali vengono calcolati, con l'ausilio del programma SOLMINEQ. 88, i valori di pCO₂) sono state osservate in corrispondenza delle piccole cascate che le incrostazioni di travertino generano lungo l'asta delle Tartare. La variazione di pCO₂ determina la precipitazione di calcite, con la conseguente diminuzione di concentrazione degli ioni Ca⁺⁺ e bicarbonato, osservata in ciascuna delle campagne di misura condotte. Come è ovvio, variano in parallelo anche i valori di conducibilità elettrica, da 375 μS/cm (20°C) alla sorgente, a 366 μS/cm, alla confluenza col Fiume Aniene.

Le determinazioni condotte in laboratorio sui principali costituenti chimici delle acque (Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- ; NO_3^-), nei siti A, C ed F (Tab. 5.3), non hanno evidenziato sostanziali variazioni di concentrazione dalla sorgente al fiume, in accordo con l'indicazione che il maggior controllo sui processi di precipitazione è dovuto alla reazione $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CaCO}_3$, in funzione della variazione di pCO_2 . Le considerazioni che i dati idrochimici forniscono, giustificano l'incremento nel tasso di precipitazione sperimentale che si osserva dalla sorgente Tartare fino alla confluenza col Fiume Aniene. Da valori quasi nulli al sito A ($0,005 \times 10^{-8} \text{ mmol}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), l'indice di precipitazione subisce un incremento, verso valle, fino a $1,447 \times 10^{-8} \text{ mmol}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, per il periodo di stazionamento delle placchette di 5 giorni e relativamente ai siti caratterizzati da flusso veloce (Fig. 5.5E). I dati sperimentali evidenziano, infatti, una maggiore precipitazione nelle condizioni di maggiore velocità e turbolenza delle acque, corrispondenti alle placchette ubicate sulla soglia di piccole dighe naturali di travertino, circa 1-2 cm al di sotto della superficie libera dell'acqua.

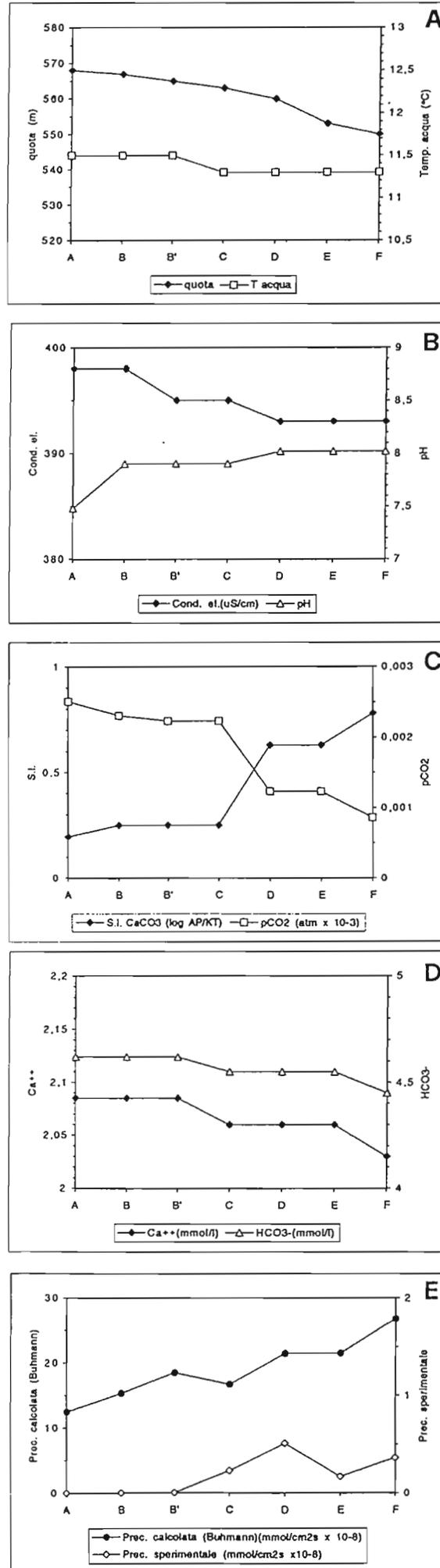


Fig. 5.4 - Campagna di sperimentazione del periodo 22/09-28/11/1995 (67 giorni). Evoluzione dei principali parametri chimico-fisici delle acque del 'Torrente Tartare' e degli indici di precipitazione sperimentale e teorico (Dreybrodt & Buhmann, 1991) dalla sorgente (sito A) alla confluenza con il Fiume Aniene (sito F).

I campioni ubicati nelle depressioni naturali (vasche), a circa 30-40 cm di profondità dalla superficie libera e con bassi valori di velocità delle acque, presentano un tasso di precipitazione inferiore, rispetto ai primi, di circa un fattore 1. Questo risultato spiega la diversa velocità di accrescimento del travertino, che genera soglie sempre più elevate (dighe naturali), non giustificabili ammettendo valori di concrezionamento confrontabili nelle diverse condizioni idrodinamiche (Zaihua *et al.*, 1995).

Sulla base dei dati chimico-fisici delle acque, misurati sul campo ed in laboratorio, sono state calcolate le quantità di precipitazione di calcite nei diversi punti stazione considerati, secondo il modello di Dreybrodt & Buhmann (1991) (Figg. 5.4E, 5.5E). I valori così ricavati, con spessore ϵ della superficie-limite pari a 1 cm, risultano superiori ai dati sperimentali di circa un ordine di grandezza, mentre dal punto di vista qualitativo dell'andamento delle variazioni, nel sistema in esame, si rileva un buon accordo tra i due metodi impiegati.

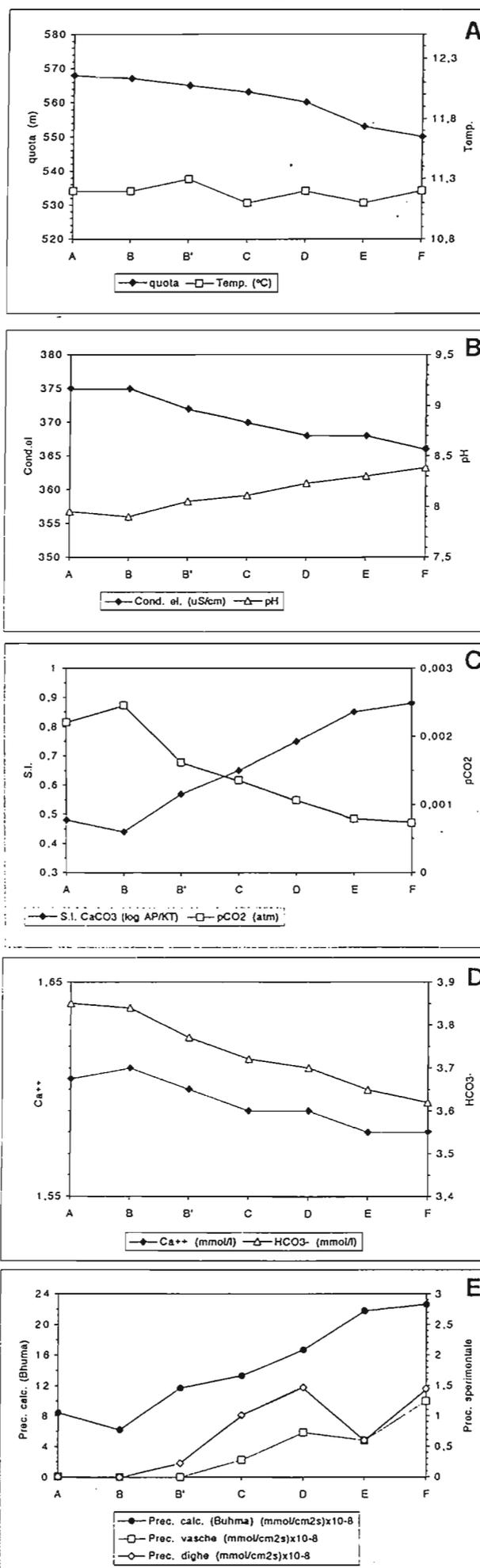


Fig. 5.5 - Campagna di sperimentazione del periodo 3-8/05/1997 (5 giorni). Evoluzione dei principali parametri chimico-fisici delle acque del Torrente Tartare e degli indici di precipitazione sperimentale e teorico (Dreybrodt & Buhmann, 1991), dalla sorgente (sito A) alla confluenza con il Fiume Aniene (sito F).

Le possibili spiegazioni in grado di giustificare lo scarto quantitativo tra i valori sperimentali e teorici sono state precedentemente riportate (inibizione della precipitazione del carbonato di calcio ad opera dello ione Mg^{++} , inibizione per presenza di ione fosfato (Michaelis *et al.*, 1984), controllo esercitato da organismi vegetali, controllo batterico).

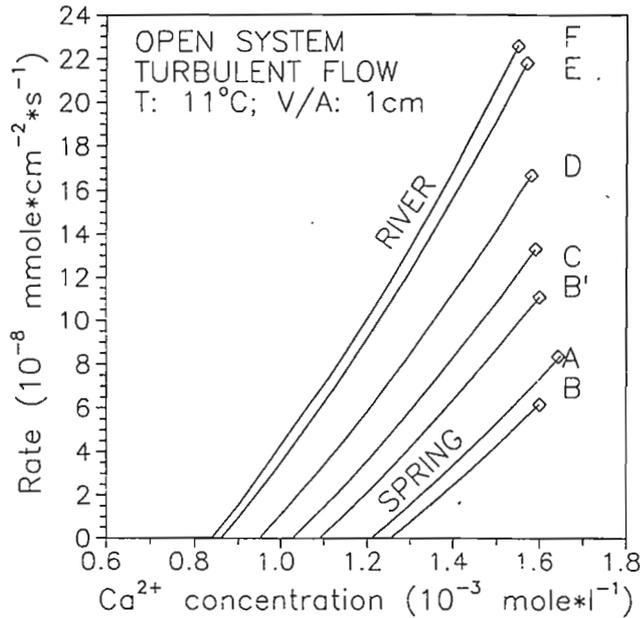


Fig. 5.6 - Indici di precipitazione calcolati dal modello di Dreybrodt & Buhmann (1991) nelle condizioni chimico-fisiche sperimentali (campagna 3-8/05/97; Tab. 5.2) dei siti A - F (Fig. 5.5E).

Secondo gli studi di Reddy (1986) sulla nucleazione della calcite su cristalli sintetici, concentrazioni dello ione Mg^{++} di qualche frazione di mmol/l, possono ridurre il tasso di deposizione di circa un ordine di grandezza. Le concentrazioni in Magnesio rilevate nelle acque della sorgente Tartare ($\sim 0,2$ mmol/l) ed il debole decremento nei valori (Tab. 5.2) che si registra da monte verso valle (per precipitazione di Mg^{++}), potrebbero spiegare, almeno in parte, l'elevato scarto tra i valori di precipitazione teorici e sperimentali. L'analisi chimica delle acque, inoltre, ha evidenziato la presenza di fosfati (0,004 mmol/l) che, sebbene in tenori molto bassi, possono ridurre sensibilmente la precipitazione di calcite. A queste considerazioni va aggiunto, tuttavia, che la presenza di alghe e piante può costituire un fattore catalizzatore nei processi di deposizione chimica, sottraendo CO_2 al sistema naturale (Bayari & Kurtas, 1995). Allo stato attuale delle conoscenze mancano elementi che consentano di precisare l'effetto fitologico sulla deposizione del travertino delle Tartare.

Si sottolinea, comunque, che non possono essere esclusi fenomeni di inibizione chimica o biologica che interagiscono con fattori catalizzanti, non considerati nei modelli teorici di deposizione della calcite nei sistemi naturali.

5.3.2. Simulazioni di laboratorio

Allo scopo di verificare le predizioni teoriche e per valutare in prima approssimazione l'influenza dello ione Mg^{2+} sui processi in esame, sono stati condotti presso i laboratori dell'Institut für Experimentelle Physik (Università di Brema) esperimenti di precipitazione del CaCO_3 da matrici liquide sintetiche, con composizione chimica confrontabile a quella delle acque della sorgente Tartare. Tali campioni sono stati preparati simulando le concentrazioni degli ioni Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , i valori di pH e di pCO_2 così come rilevati nei sette siti di campionamento (Fig. 5.2).

In laboratorio sono state simulate, inoltre, le condizioni di flusso turbolento (in sistemi chiusi), mediante agitazione a 350 giri/minuto di un volume noto di soluzione in recipiente di *Teflon* sigillato, con valore dell'indice di saturazione rispetto alla calcite pari a quello rilevato in campagna (Tab. 5.2). La precipitazione di CaCO_3 dalla soluzione, misurata come decremento di conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$; 25°C), è stata indotta tramite immissione nel sistema di una quantità nota (per poter ricavare il rapporto V/A del volume della fase liquida sulla superficie del solido a contatto con essa) di carbonato di calcio in polvere (3 g CaCO_3), sia sintetico ('*Baker Analyzed Reagent CaCO₃*') che naturale (marmo di Carrara; Dreybrodt *et al.*, 1997).

I risultati degli esperimenti condotti, espressi in termini di 'tasso di precipitazione' in rapporto al decremento di concentrazione di Ca^{2+} , vengono riportati nelle Figure 5.7 e 5.8.

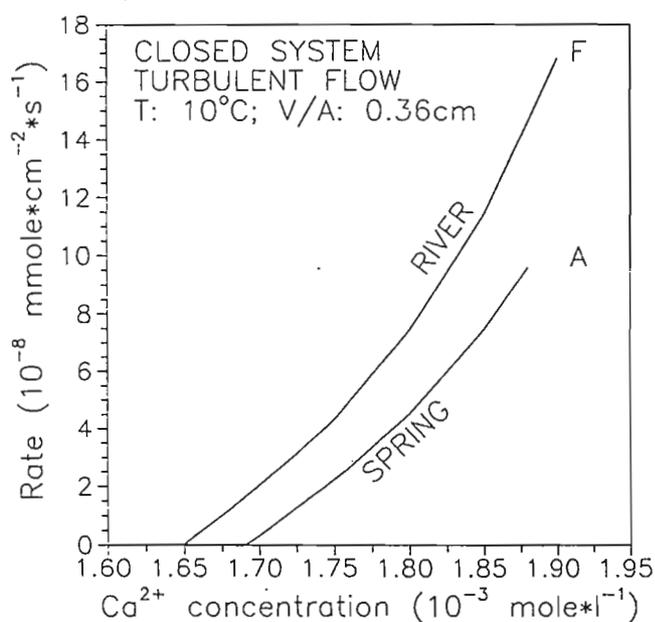


Fig. 5.7 - Indici di precipitazione in funzione della concentrazione dello ione Ca^{2+} , relativi agli esperimenti su acque sintetiche della sorgente Tartare (sistema chiuso a scambi di CO_2 con l'esterno). In tali matrici liquide vengono simulate le concentrazioni in Ca, Mg, HCO_3^- rilevate sul campo.

Le due serie di esperimenti differiscono per le condizioni fisiche imposte al sistema chiuso: T: 10°C , $\epsilon = 0,36 \text{ cm}$ e T: 25°C , $\epsilon = 0,036 \text{ cm}$, rispettivamente. I valori di pH, pCO_2 e la concentrazione iniziale di Ca^{2+} sono quelli sperimentalmente rilevati sul campo in occasione della campagna di misure del periodo 5-8/0597 (Tab. 5.2).

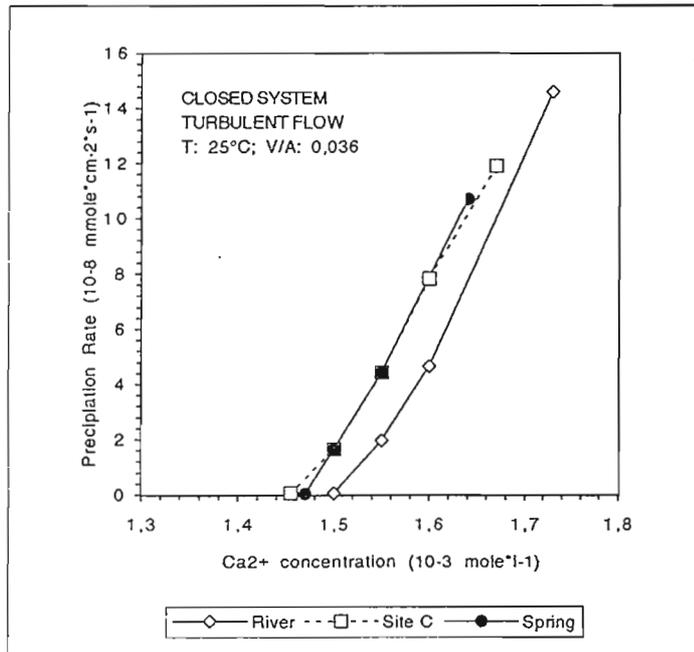


Fig. 5.8 - Indici di precipitazione in funzione della concentrazione dello ione Ca^{2+} , relativi agli esperimenti su acque sintetiche di composizione chimica affine (Ca, Mg, HCO_3^-) alle condizioni naturali della sorgente Tartare (sistema chiuso).

In Fig. 5.9 vengono messi a confronto i risultati della seconda serie di esperimenti ($T: 25^\circ\text{C}$, $\epsilon = 0,036 \text{ cm}$) con quelli sperimentali (misurati sul campo) e teorici (calcolati dal modello di Dreybrodt & Buhmann, 1991; Fig. 5.5).

Dai risultati riportati viene messo in evidenza uno scarto tra i valori del tasso di precipitazione 'simulato' (*test di precipitazione in lab.*) e 'sperimentale' (*incremento in peso su placchette di marmo*) pari circa a un ordine di grandezza, confrontabile con quello desunto dai dati 'calcolati' (*applicazione del modello matematico di Dreybrodt et al.*). Tale risultato sembrerebbe confermare quanto già sottolineato circa possibili fenomeni di "inibizione" dei processi di precipitazione della calcite nel sistema naturale rispetto alle previsioni teoriche. Allo stato attuale delle conoscenze del sistema Tartare e sulla base dei risultati ottenuti, non si può escludere un rilevante controllo sulla cinetica in esame esercitato dallo ione Mg^{2+} (Tabb. 5.2 e 5.3).

Ulteriori esperimenti di simulazione programmati sul campo e attualmente in fase di allestimento (*test di precipitazione - in sistemi chiusi - da acque naturali della sorgente Tartare per immissione di CaCO_3 sintetico*), consentiranno di approfondire le conoscenze sulla dinamica di

precipitazione della calcite e sui fenomeni di inibizione che agiscono nel sistema carsico in esame.

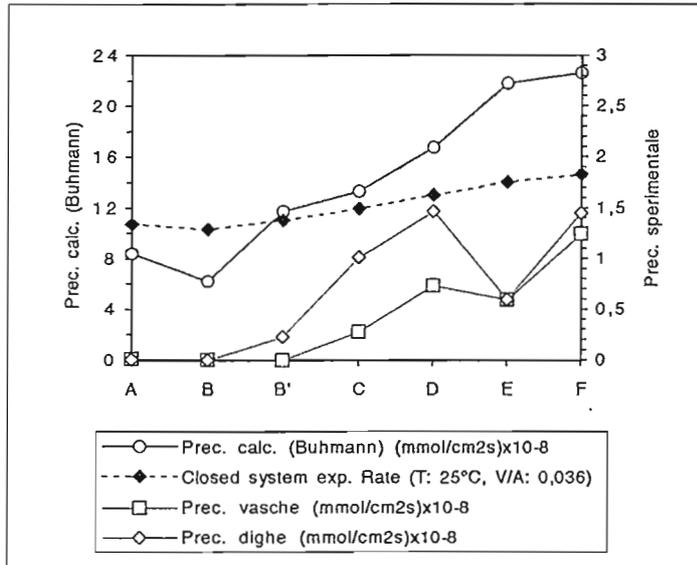


Fig. 5.9 - Campagna di sperimentazione del periodo 3-8/05/1997 (5 giorni; Fig. 5.5). Confronto con i dati relativi agli esperimenti di precipitazione da sistemi chiusi (T: 25°C), su matrici liquide sintetiche di composizione chimica affine (Ca, Mg, HCO_3^-) alle condizioni naturali della sorgente Tartare.

5.4. Considerazioni sui risultati

I risultati sperimentali sulla precipitazione di carbonato di calcio indicano nella sorgente Tartare un sistema in cui fenomeni di inibizione rallentano la velocità di formazione del travertino rispetto a quella attesa sulla base delle previsioni teoriche. Un importante limite degli studi condotti consiste nella analisi dei soli processi inorganici del fenomeno di precipitazione di CaCO_3 da acque naturali, mentre è nota l'influenza che alghe, piante, funghi o batteri esercitano sui processi in esame. Viene sottolineato, inoltre, l'inibizione della precipitazione di CaCO_3 possa derivare anche dalla presenza di ioni $\text{PO}_4^{=}$ nelle acque. Nel caso della sorgente Tartare possibili fenomeni di inquinamento con rilascio di fosfati da insediamenti urbani presenti a monte dell'emergenza (Piani di Arcinazzo) potrebbero giustificare tale ipotesi.

CONCLUSIONI

La ricerca, indirizzata allo studio del comportamento idrodinamico di acquiferi ad elevata anisotropia, prende in esame l'idrostruttura carsica simbruino-ernica.

Dall'analisi idrogeochimica, isotopica e dal monitoraggio di un sistema ritenuto rappresentativo della catena appenninica laziale-abruzzese, risalta alla scala di dettaglio la variabilità dinamica di un acquifero fessurato e carsificato, ottenendosi indirettamente elementi conoscitivi sulla gerarchizzazione del reticolo ipogeo nella roccia serbatoio.

Alla scala regionale delle osservazioni, dati geochimici, isotopici ed idrologici delle acque sia di superficie che sotterranee, consentono di precisare i limiti della idrostruttura simbruina nel settore nord-occidentale della dorsale appenninica, delimitato ad Ovest dalla linea Olevano-AnTRODoco.

Oltre al Fiume Aniene, i livelli di base della idrostruttura simbruina sono rappresentati dalle sorgenti del Gruppo "Agosta s.l." e del Rio Bagnatore, in riva destra, e dalle sorgenti del Gruppo "Marano Equo - Anticoli Corrado", in riva sinistra. Queste ultime includono numerose emergenze prevalentemente gassose (CO_2 , H_2S) note localmente come "acque minerali", la cui presenza si limita al settore pedemontano dei Monti Ruffi. In particolare, la situazione idrogeologica dell'area di emergenza delle manifestazioni gassose di Marano Equo-Anticoli Corrado, è vincolata alla geometria della idrostruttura simbruina che, nel medio Aniene, risulta disarticolata in elementi strutturali verosimilmente associati alla tettonica attiva.

Il monitoraggio sistematico (1995-1996) del regime di flusso del reticolo idrografico dell'alto Aniene, comprensivo dei tributari Simbrivio e Fosso Campo, permette di avanzare ipotesi sulla circolazione negli acquiferi fessurati e carsificati. In particolare, viene evidenziato il ruolo idrodinamico delle linee di drenaggio che si sviluppano nelle principali discontinuità strutturali e nel reticolo di condotti di grandi dimensioni, come principale circuito di alimentazione del Fiume Aniene da parte della falda carsica basale. Viene valutato, in tal modo, un diverso contributo delle 'sorgenti lineari' alla portata del fiume, rispetto alle precedenti acquisizioni riportate in letteratura.

L'analisi degli idrogrammi della sorgente Inferniglio e le variazioni chimico-fisiche delle acque costituiscono le basi sperimentali per un approfondimento delle conoscenze sulle modalità di trasferimento delle precipitazioni in un mezzo con forte anisotropia, dall'area di alimentazione all'emergenza. La ricerca ha permesso di formulare un modello concettuale della circolazione nelle zone areata e satura della roccia serbatoio, basato sulla correlazione tra i dati idrodinamici e chimico-fisici della sorgente di cui si identificano diverse matrici liquide che contribuiscono, in diversa misura, alla formazione della portata totale. Dall'analisi viene precisato il ruolo idrodinamico e idrogeochimico svolto dal serbatoio epicarsico, le cui risorse idriche "sospese"

si differenziano sotto il profilo chimico e fisico da quelle caratteristiche sia del flusso di base che del flusso veloce nell'insaturo, come si rileva in occasione di eventi di piena della sorgente Inferniglio.

Lo studio di cicli di piena osservati alla sorgente Inferniglio mette in evidenza, inoltre, la variabilità della portata e dei meccanismi di trasferimento delle acque, in relazione al regime degli afflussi e alle modalità di infiltrazione nella roccia serbatoio (diffusa o concentrata).

I processi di precipitazione della calcite nei sistemi in equilibrio con $p\text{CO}_2$ atmosferica sono stati investigati con metodiche di recente sviluppo che permettono di determinare sperimentalmente il tasso di precipitazione di CaCO_3 . I dati sperimentali vengono messi a confronto con le previsioni teoriche del tasso di precipitazione, sulla base di un modello chimico-fisico che tiene conto anche delle condizioni idrodinamiche del sistema.

I valori sperimentali, misurati alla sorgente carsica Tartare (alto Aniene), sono risultati inferiori a quelli teorici di un ordine di grandezza, evidenziando la presenza, nel sistema naturale, di fattori che inibiscono la precipitazione del carbonato di calcio.

Oltre agli effetti che i processi biologici svolgono sull'equilibrio $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$, deve essere considerato anche il ruolo inibitore esercitato da specie ioniche quali Mg^{2+} e PO_4^{2-} .

RINGRAZIAMENTI

Molte persone hanno contribuito alla realizzazione di questo lavoro, ed è mia intenzione ringraziare tutti per il contributo e il sostegno.

I miei ringraziamenti sono indirizzati innanzitutto al Dott. Luca D'Amelio e al Prof. A. Longinelli, dell'Università degli Studi di Trieste, che hanno condotto le analisi isotopiche sui numerosi campioni raccolti nei tre anni di lavoro.

Un particolare riconoscimento va al Prof. W. Dreybrodt, dell'Università di Brema, per il contributo fornito nello studio dei processi di precipitazione del carbonato di calcio nonché per il sostegno finanziario concesso durante il soggiorno in Germania, presso i laboratori di Fisica Sperimentale. Il mio lavoro a Brema non sarebbe stato, inoltre, così ricco di risultati senza il prezioso e paziente aiuto del Dott. L. Eisenlohr, dell'Università di Neuchâtel.

Devo un particolare ringraziamento alla disponibilità e alla scrupolosità di Guido Aurisicchio, del Centro di Studio per gli Equilibri Sperimentali in Minerali e Rocce (CNR), presso il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università "La Sapienza" di Roma, che ha collaborato alle analisi chimiche delle acque in assorbimento atomico.

Non posso dimenticare, inoltre, l'aiuto e l'ospitalità di Romano Perilli, "Pelò" Proietti-Rocchi, Gianni Salvatori e "Betto" Segatori, e dei Dott. F. Mattina e G. Moccia della Provincia di Roma, che mi hanno messo a disposizione una 'base operativa' sui Monti Simbruini, essenziale per l'esecuzione dei rilievi di campagna.

Voglio ricordare la disponibilità dell'Ing. M. Bencivenga e dei suoi collaboratori, dell'Ufficio di Roma del Servizio Idrografico e Mareografico di Stato, per l'acquisizione ed elaborazione dei dati storici, climatici ed idrologici, degli osservatori dell'area simbruino-ernica.

F. Brondi, S. Malinconico, F. Pefumi, C. Peris e M. Vinci hanno collaborato, nel periodo 1996-1997, ai rilievi di campagna, fornendo un insostituibile aiuto nell'acquisizione dei dati di base.

Voglio esprimere, inoltre, la più profonda gratitudine alla mia famiglia e a Stefania, per il sostegno, la pazienza e la comprensione dimostrata: è a loro che dedico questo lavoro.

Bibliografia generale

- Accordi B., Angelucci A., Avena G.C., Bernardini F., Boni C.F., Bruno F., Cercato M., Coppola C., Fiore G., Funicello R., Giglio G., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Mattioli B. & Parotto M. (1969) - *Idrogeologia dell'alto bacino del Liri (Appennino centrale)*. Geol. Rom., 8, 177-559.
- Accordi G., Carbone F., Civitelli G., Corda L., De Rita D., Esu D., Funicello R., Kotsakis T., Mariotti G. & Sposato A. (1988) - *Note illustrative alla Carta delle Litofacies del Lazio-Abruzzo ed aree limitrofe*. Quad. Ric. Scient., 114 (5), 223 p.
- Accordi G., Carbone F., Civitelli G., Corda L., De Rita D., Esu D., Funicello R., Kotsakis T., Mariotti G. & Sposato A. (1986) - *Lithofacies map of Latium and neighbouring areas*. CNR, Prog. Fin. Geodinamica., sottoprogetto: Ricostruzioni paleogeografiche, paleotettoniche e applicazioni ai giacimenti minerali, Roma.
- Accordi B. (1966) - *La componente traslativa nella tettonica dell'Appennino Laziale-Abruzzese*. Geol. Rom., 5, 355-406.
- Baumann J., Buhmann D., Dreybrodt W., Schulz. H.D. (1985) - *Calcite dissolution Kinetics in porous media*. Chemical Geology, 53 (1985) 219-228.
- Bayari C.S. & Kurttas T*. (1996) - *Algae: an important agent in deposition of karstic travertines: observations on natural-bridge Yerkorpu Travertines, Aladaglar, Eastern Tauridis-Turkey*. (*International Research & Application Center for Karst Water Resources, Hacettepe University, Beytepe Ankara, Turkey).
- Beneo E. (1936) - *La formazione miocenica e la tettonica della Val Roveto (alta vale del Fiume Liri)*. Boll. R. Uff. Geol. d'It., 61, 1-19.
- Boni C. & Bono P. (1982) - *Prima valutazione quantitativa dell'infiltrazione efficace sui sistemi carsici della piattaforma carbonatica laziale-abruzzese e nei sistemi di facies pelagica umbro-marchigiano-sabina (Italia centrale)*. Geol. Appl. e Idrog., Bari, 17.
- Boni C., Bono P. & Capelli G. (1986) - *Schema idrogeologico dell'Italia centrale (scala 1/500.000)*. Mem. Soc. Geol. It. 35 (1986), 991-1012.
- Boni C., Bono P. & Capelli G. (1988) - *Schema idrogeologico della Regione Lazio (scala 1/250.000)*. Regione Lazio (Ass. Prog. I.C.A., Uff. Parchi e Riserve) - Univ. degli Studi "La Sapienza" (Roma), 1988.
- Boni C., Bono P. & Capelli G. (1982) - *Valutazione dell'infiltrazione efficace in un bacino carsico dell'Italia centrale: confronto con analoghi bacini rappresentativi di diversa litologia*. Geol. Appl. e idrog., 17/II, atti del II simposio Intern. "Utilizzazione delle aree carsiche".
- Boni. C., Bono P., Calderoni G., Lombardi S., Turi B. (1980) - *Indagine idrogeologica e geochimica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella Pianura Pontina (Lazio meridionale)*. Geol. Appl. e Idrog., Bari, 15, 203-247.
- Boni C., Bono P., Capelli G., Lombardi S., Parotto M. & Ventura G. *Indagine idrogeologica e geochimica nell'appennino laziale-abruzzese. Primi risultati della campagna 1976-78*. Atti 1° Seminario Informativo CNR "Energia Geotermica". Roma, 1979.

Bono P. (1981) - *Valutazione preliminare del potenziale geotermico della regione laziale*. Geol. Rom., **20** (1981), 69-78.

Bono P. & Percopo C. (1996) - *Flow dynamics and erosion rate of a representative karst basin: Upper Aniene River (Central Italy)* - Environmental Geology (1996) **27**: 210-218

Brondi M., Dall'Aglio M., Falchi G. & Orlandi C. (1983) - *Trace element distribution in the major aquifers of the Latium Region*. Int. Conf. Heavy Metals in the Environment. Heidelberg. **1**, 680-683.

Brondi M., Campanile R., Dall'Aglio M., Orlandi C., Tersigni S. & Venanzi G. (1995) - *Acque Naturali*. in: Lazio Meridionale. Sintesi delle ricerche geologiche multidisciplinari. ENEA, Dip. Ambiente, Serie 'Studi e Ricerche', Roma 1995.

Buhmann D. & Dreybrodt W. (1985a) - *The Kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas. 1 - Open System*. Chemical Geology, **48** (1985) 189-211.

Buhmann D. & Dreybrodt W. (1985b) - *The Kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas. 2 - Closed System*. Chemical Geology, **53** (1985) 109-124.

Busenberg E. & Plummer L.N. (1986) - *A comparative study of the dissolution and crystal growth kinetics of calcite and aragonite*. In 'Studies in diagenesis', US Geological Survey Bull. **1578**, 139-169.

Cantelli C., Castellarin A., Colacicchi R. & Praturlon A. (1982) - *La scarpata tettonica mesozoica lungo il settore nord della "Linea Ancona-Anzio"*. Mem. Soc. Geol. It., **24** (1982), 149-153.

Castellarin A., Colacicchi R., Praturlon A. & Cantelli C. (1982) - *The Jurassic - lower Pliocene history of the Ancona Anzio line (Central Italy)*. Mem. Soc. Geol. It., **24**, 325-336.

Cavinato G.P., Corrado S., Sirna M. (1992) - *Dati preliminari sull'assetto geologico-strutturale del settore sud-occidentale della struttura simbruino-ernica*. Studi Geologici Camerti, Vol. spec. 1991/2, CROP 11, 33-42.

Celico P (1988) - *Prospezioni idrogeologiche*. Vol. I e II, Liguori Ed., 1988, Napoli.

Coutagne A. (1956) - *La pouvoir évaporant de l'atmosphère*. Rev. Gen. de l'Hydraulique, **73**.

Corrado S. & Parotto M. (1995) - *Nuovi vincoli geometrico-cinematici all'evoluzione neogenica del tratto meridionale della Linea Olevano -Antrodoco*. Boll. Soc. Geol. It., **114**-1995, 245-276, Vol. CXIV.

Dall'Aglio M. & Tonani F. (1962) - *Studio idrogeochimico delle acque superficiali del Lazio*. Notiziario del C.N.E.N., anno 8 (1962), **11**, 1-25.

Damiani A.V. (1982) - *Ipotesi per l'inquadramento neotettonico dell'area Lepino-Simbruino-Ernica-Marsicana (Lazio-Abruzzo)*. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl. n. **506**, 53-65.

Damiani A.V., Molinari V., Pichezzi R.M., Panseri C. & Giovagnoli M.C. (1990) - *Il passaggio Cretacico-Terziario nei sedimenti carbonatici di piattaforma dei Monti Affilani (Lazio)*. Mem. Serv. Geol. d'It., **38**-1990, 21-38.

- Damiani A.V. (1990a) - *Studi sulla piattaforma carbonatica laziale-abruzzese. Nota I. Considerazioni e problematiche sull'assetto tettonico e sulla paleogeologia dei Monti Simbruini*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It. XXXVIII (1990), 145-176.
- Damiani A.V. (1990b) - *Studi sulla piattaforma laziale-abruzzese. Nota II. Contributo alla interpretazione della evoluzione tettonico sedimentaria dei Monti Affilani e "pre-ernici"*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It. XXXVIII (1990), 177-206.
- Devoto G. (1969) - *Alcune considerazioni sul Miocene terminale laziale-abruzzese*. Atti della Accademia Gioenia di SC. Nat. in Catania, serie VII, vol. I, 17-24.
- Devoto G. (1970) - *Sguardo geologico dei Monti Simbruini (Lazio nord-orientale)*. Geol. Rom., **9**, 127-136.
- Dreybrodt W., Buhmann D., Michaelis J., Usdowski E. (1992) - *Geochemically controlled calcite precipitation by CO₂ outgassing: Field measurement of precipitation rates in comparison to theoretical predictions*. Chemical Geology, **97** (1992) 285-294.
- Dreybrodt W. (1988) - *Processes in Karst System. Physics, Chemistry and Geology*. Springer Verlag ed.
- Dreybrodt W. & Buhmann D. (1991) - *A mass transfer model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion*. Chemical Geology, **90** (1991), 107-122
- Dreybrodt W. (1981) - *Kinetics of the dissolution of calcite and its applications to karstification* Chemical Geology, **31** (1981), 245-269
- Dreybrodt W., Lauckner J., Zaihua L., Svensonn U., Buhmann D. (1996) - *The kinetics of the reactions $CO_2+H_2O \rightarrow H^++HCO_3^-$ as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system $H_2O-CO_2-CaCO_3$* . Geochim. Cosmochim. Acta, **60**-18, 3375-3381
- Dreybrodt W., Eisenhor L., Madry B., Ringer S. (1997) - *Precipitation kinetics of calcite in the system $CaCO_3-H_2O-CO_2$: The conversion to CO_2 by the slow process $H^++HCO_3^- \rightarrow CO_2+H_2O$ and the inhibition of surface controlled reactions as rate limiting steps*. Geochim. Cosmochim. Acta, 1997, in print.
- Drogue C (1972) - *Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques*. Journal of Hydrology, **15** (1972), 49-68, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Drogue C. (1992) - *Hydrodynamics of karstic aquifer: experimental sites in the Mediterranean karst, Southern France*. In Back W. - Hydrogeology of selected Karst Regions. Hannover, Heise, 133-149.
- Duchi V., Paolieri M. & Pizzetti A (1991) - *Geochemical study on natural gas and water discharges in the Southern Latium (Italy): circulation, evolution of fluids and geothermal potential in the region*. Journal Volc. Geotherm. Res., **47**, 221-235.
- Forkasiewicz J. e Paloc H. (1967) - *Le régime de tarissement de la Foux de la Vis*. Chronique Hydrogéologique, BRGM, **10**, 59-73.
- Frosini P. (1961) - *La carta della precipitazione media annua in Italia per il trentennio 1921-1950*. Pubbl. 24 Serv. Idr. di Stato, Fascicolo XIII, Roma.
- Galabov M. (1972) - *Sur l'expresion mathématique des hydrogrammes des sources et le pronostic du débit*. Bull. du B.R.G.M., **2**, 51-57.

- Governa M.E., Lombardi S., Masciocco L., Riba M. & Zuppi G.M. (1989) - *Karst and geothermal water circulation in the Central Appennines* (Italy), International atomic energy agency, AC 329.2/9 Vienna.
- Hermann J.S., & Lorah M.M. (1988) - *Calcite precipitation rates in the field: Measurement and prediction for a travertine-depositing stream*. *geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 2347-2355.
- Hess J.W. & White B.W (1988) - *Storm response of the karstic carbonate aquifer of southcentral Kentucky*. *Journal of Hydrology*, **99** (1988) 235-252, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.
- Inskeep W.S. & Bloom P.R. (1985) - *An evaluation of rate equations for calcite precipitation at pCO₂ less than 0,01 atm and pH greater than 8*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **49**, 2165-2180.
- Kharaka Y.K., Gunter W.D., Aggarwal P.K., Perkins P.H., Debraal J.D. (1988) - *SOLMINEQ 88. A computer program for geochemical modelling of water-rock interactions*. U.S.Geological Survey Water Res. Inv. Rep., **88-4227**, 207 pp.
- Klimchouk A. (1995) - *Karst Morphogenesis in the epikarst zone*. *Cave and Karst Science*, vol. **21**, 45-50 N°. 2, Marzo 1995. Transactions of the British Cave Research Association.
- Kozel R., Meus P., Mateo J. & Monroy J. (1986) - *Heterogeneite de l'infiltration dans le Karst: exemple de la grotte "Chez-le-Brandt (Jura neuchatelois)*. *Compte rendu des journées de printemps du Groupe suisse des Hydrogéologues*, Mai 1986. Université de Liege.
- Lodi P. (1994) - *Idrogeologia del bacino rappresentativo Alto Aniene: acquisizione dati anno 1994*. Tesi di Laurea inedita. Università degli Studi di Roma "La Sapienza".
- Maillet E. (1905) - *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*, (ed. Herman), Parigi, 218 p.
- Mennella C. (1967) - *Il clima dell'Italia*, Vol. 1, Fratelli Conte editori, Napoli.
- Mennella C. (1973) - *Il clima dell'Italia*, Vol. 3, Fratelli Conte editori, Napoli .
- Michaelis J., Usdowski E., Menschel G. (1984) - *Kinetische Faktoren der CaCO₃ Abscheidung und der Fraktionierung von ¹²C und ¹³C*. *Z. Wasser-Abwasser-Forsch.* **17**, 31-36.
- Milanovic P. (1986) - *Influence of the karst spring submergence on the Karst aquifer regime*. *Journal Hydrology*, **84** (1986) 141-156, Elsevier Science Publishers, Amsterdam
- Miller T. (1983) - *Hydrology and hydrochemistry of the caves Branch Karst, Belize*. *Journal of Hydrology*, **61** (1983) 83-88 Elsevier Science Publishers Amsterdam.
- Ministero Dei Lavori Pubblici (1926/1980) - *Annali Idrologici, Ufficio Idrografico di Stato, sezione di Roma, Parte I e II*.
- Mostardini F. & Merlini S. (1986) - *Appennino centro-meridionale Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale*. *Mem. Soc. Geol. It.*, **35**, 177-202 (3 tavv. fuori testo)
- Naso G., Parotto M., Tallini M., Tozzi M. (1992) - *Meccanismi transpressivi nell'Appennino centrale: la linea Vallepietra-Filettino (Monti Simbruini, Lazio)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, **111-1992**, 163-179.

Padilla A., Pulido-Bosch A. and Mangin A. (1994) - *Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographes of karst spring*. Ground Water, **32**, 2, 267-277.

Parotto M., Tallini M. & Tozzi M. (1990) - *Accavallamenti e strutture retrovergenti in aree di piattaforma carbonatica: l'esempio di Jenne (Monti Simbruini, Appennino centrale)*. Mem. Soc. Geol. It., **45**-1990, 01-08.

Parotto M. (1971) - *Stratigraphy and tectonics of the eastern Simbruini and western Marsica range (Central Apennines, Italy)*. Mem. Acc. Naz. Lincei., Classe di Sc. Fis., Mat. e Nat., **8**, 10, Roma.

Parotto M. & Praturlon A. (1975) - *Geological summary of the Central Apennines. Structural Model of Italy*. C.N.R., Quad. Ric. Sc., **90**, 257-311.

Pefumi F. (1995) - *Idrogeologia del bacino rappresentativi Alto Aniene: acquisizione dati anno 1995* Tesi di Laurea inedita. Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Percopo C. (1991) - *Idrogeologia del bacino rappresentativi Alto Aniene: acquisizione dati anno 1991* Tesi di Laurea inedita. Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Plummer L.N., Wigley T.M.L., Parkhurst D.L. (1978) - *The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5°C to 60°C and 0.0 to 1.0 atm CO₂*. Amer. J. Sci., **278**, 179-216.

Reddy (1986) - *Effect of Magnesium ion on calcium carbonate nucleation and crystal growth in dilute aqueous solutions at 25°C*. In Studies in diagenesis (U.S. Geological Survey, Bull. **1578**, 169-182.

Salvini F. & Vittori E. (1982) - *Analisi strutturale della linea Olevano-Antrodoco-Posta (Ancona-Anzio Auctt.): metodologia di studio delle deformazioni fragili e presntazione del tratto meridionale*. Mem. Soc. Geol. It., **24**, 337-355.

Shuster E.T. and White W.B. (1971) - *Seasonal fluctuation in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers*. Journal of Hydrology, **14** (1971), 93-128; North-Holland Publishing Co. Amsterdam.

Svensonn U. & Dreybrodt W. (1992) - *Dissolution kinetics of natural calcite minerals in CO₂-water system approaching calcite equilibrium*. Chemical Geology, **100** (1992), 129-145.

Terragni F. (1992) - *Indagini idrogeologiche con traccianti colorati nella Grotta degli Urli (M.ti Simbruini sud-orientali)*. Notiziario del Circolo Speleologico Romano-Nuova serie, **6-7**:43-65.

Tison G. (1960) - *Courbe de tarissement, coefficient d'écoulement et perméabilité du bassin*. Mém. A.I.H.S., Helsinki, 229-243.

Travia G (1992) - *Idrogeologia del bacino rappresentativi Alto Aniene: acquisizione dati anno 1992*. Tesi di Laurea inedita. Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Turc L. (1955) - *Le bilan d'eau des sols. relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Ann. Agron. **5**.

Turco A. (1993) - *Idrogeologia del bacino rappresentativi Alto Aniene: acquisizione dati anno 1993* Tesi di Laurea inedita. Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Thornthwaite C.W. & Mather J.R. (1957) - *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Pubbl. Clim. Drexel Inst. Technol., **10**.

Vervier P. (1990) - Hydrochemical characterization of the water dynamics of a karstic system. *Journal of Hydrology*, **121** (1990), 103-117; Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

Viparelli C. (1964) - *Idrologia applicata all'ingegneria*. Fomd. Polit. Mezz. d'It., **5**.

Williams P.W. (1983) - The role of the subcutaneous zone in the karst Hydrology. *Journal of Hydrology*, **61** (1983), 45-67, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

Zaihua L., Svensson U., Dreybrodt W., Daoxian Y., Buhmann D. (1995) - *Hydrodynamic control of inorganic precipitation in Huanglong Ravine, China: Field measurements and theoretical prediction of deposition rates*. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**-15, 3087-3097.

Zhnang D., Fischer H., Bauer B*. (1995) - *Field tests of limestone dissolution rates in Karstic Mt. Kräuterin, Austria.. Cave and Karst Science*, **21**-2, 101-104 (*Institute of Geography, University of Vienna, 1995).

Zuppi G.M., Fontes J. Ch, & Letolle R. (1974) - *Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfurees dans le Latium. Isotope thecniques in groundwater hydrology*, 1974, **1**, 341-361 IAEA - SM 182/16.