

Gruppo Grotte Recanati

In collaborazione con

Gruppo Autonomo Speleologico Portocivitanova
— Civitanova Marche —

Centro Ricerche Speleologiche "Nottoloni"
— Macerata —

Gruppo Speleologico Alta Valle del Potenza
— Pioraco —

PROGETTO DI RICERCA

LA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA NELL'ALTA VALLE DEL POTENZA

RELAZIONE FINALE



Introduzione

Negli ultimi decenni l'attenzione dei ricercatori che si sono occupati di grotte e carsismo nella regione marchigiana si è concentrata sulle grotte legate al flusso di acque sulfuree, in cui sono state effettuate approfondite ricerche su processi speleogenetici, storia evolutiva, ecosistema e fauna sotterranea. Grotte di questo tipo si formano principalmente per l'azione solvente di acque che risalgono dall'interno della struttura montuosa, e per questa ragione sono dette ipogeniche; hanno avuto una simile origine i maggiori complessi carsici della regione, come Frasassi, Acquasanta Terme, Monte Cucco, e probabilmente Monte Nerone, nonché alcune grotte minori.

Oltre alle grotte ipogeniche, nella regione marchigiana ci sono numerose altre grotte create dall'azione solvente delle acque piovane direttamente assorbite dalla superficie. Queste grotte non raggiungono volumi ed estensioni paragonabili alle precedenti, ma la loro importanza non va trascurata, in quanto si tratta di fenomeni diffusi in tutte le dorsali montuose calcaree, al cui interno si trovano i più importanti acquiferi della regione, largamente utilizzati per fini idropotabili. I processi carsici svolgono un ruolo determinante nella circolazione sotterranea delle acque in rocce solubili, e pertanto il loro studio è importante non solo sotto il puro aspetto della conoscenza, ma anche ai fini della tutela e del razionale impiego di queste riserve idriche dell'area montana, oggi anche più preziose viste le insoddisfacenti condizioni degli acquiferi di

fondovalle, più direttamente esposti al rischio di inquinamento dovuto ad attività agricole, industriali, o all'urbanizzazione.

L'alta valle del Potenza rappresenta un ottimo terreno di studio di processi e morfotipi carsici prodotti dall'infiltrazione di acque meteoriche, rappresentativo delle problematiche nella zona montana dell'Appennino marchigiano. In un'area relativamente piccola si trova infatti un'ampia varietà di fenomeni diversi: numerose grotte, seppure di ridotta estensione, un piano carsico drenato da un inghiottitoio, sorgenti alimentate da acquiferi di diversa tipologia ed ubicate sia nel fondovalle che sui versanti montuosi.

Questo studio è stato basato sull'analisi delle sorgenti e delle forme carsiche superficiali e sotterranee. Sono state verificate le caratteristiche morfologiche d'insieme e di dettaglio di tutte le grotte conosciute, in relazione alle funzioni idrologiche ed allo stato di attività idrica; sono inoltre stati monitorati i parametri chimici e fisici di alcune sorgenti rappresentative delle diverse tipologie di acquiferi. Le ricerche hanno riguardato principalmente la dorsale appenninica più interna, a monte dell'abitato di Castelraimondo, nell'area compresa tra il Fiume Potenza a nord e la Valle del Chienti a sud.

L'ambiente Geologico

La conformazione geografica

L'area studiata comprende la parte montana del bacino idrografico del Fiume Potenza, che con andamento lineare attraversa in senso trasversale il versante adriatico della catena appenninica per una lunghezza totale di circa 95 km, scavando una profonda incisione valliva nelle dorsali montuose. L'area ha una morfologia di tipo collinare e montuoso, e si può riconoscere una decisa rispondenza tra le regioni morfologiche e la distribuzione dei terreni; l'area montana corrisponde con buona approssimazione alle principali strutture antiformi, dove affiorano i terreni calcarei e calcareo marnosi mesozoici e cenozoici. Due catene montuose principali si sviluppano in senso NNO-SSE, parallelamente alla costa adriatica, ricongiungendosi verso sud nei Monti Sibillini, dove si raggiungono le massime elevazioni (Monte Vettore, m 2476). Le due dorsali sono separate da un'area a morfologia collinare sviluppata in rocce terrigene mioceniche, con altitudini comprese per lo più tra i 350 ed i 500 m.

Nella zona di studio la catena interna raggiunge quote di oltre 1300 m ed è costituita in dettaglio da più dorsali parallele, separate da zone strutturalmente depresse in cui affiorano terreni più recenti. La dorsale esterna ha una conformazione più semplice, essendo formata da un'unica struttura che raggiunge quote di poco superiori agli 800 m in una evidente flessura della dorsale rispetto

alle zone settentrionali e meridionali della stessa catena.

Inquadramento geologico e geomorfologico regionale

L'attuale conformazione orografica è il risultato di una lunga successione di eventi che nell'arco di oltre 200 milioni di anni hanno portato prima alla formazione delle rocce in ambiente marino, poi alla loro deformazione durante il sollevamento della catena montuosa, ed infine al modellamento ad opera degli agenti meteorici, dopo l'emersione dai fondali marini. La geologia della regione marchigiana è ben conosciuta, grazie ad approfondite ricerche di tipo stratigrafico e tettonico svolte durante parecchi decenni, ed è descritta in dettaglio nell'abbondante bibliografia specialistica. Una trattazione sintetica può essere trovata in Minetti *et al.* (1991) e, in un lavoro più recente, in Deiana *et al.* (2009); di seguito sono riassunti i punti essenziali relativi agli aspetti geologici generali dell'area di studio.

GIURASSICO-MIOCENE

La dorsale montuosa umbro-marchigiana è una catena a pieghe e sovrascorrimenti, a vergenza orientale, in cui affiorano rocce sedimentarie appartenenti alla successione umbro-marchigiana, deposte dal Giurassico al Miocene (Fig.1). La parte inferiore della successione marina si è originata in una vasta piattaforma con mare poco profondo e

comprende due unità principali: la Formazione di Burano (Triassico superiore), una formazione evaporitica di elevato spessore, non affiorante, formata da un'alternanza di anidriti e dolomie; il Calcare Massiccio (Giurassico inferiore), un'unità calcarea molto compatta, di circa 700-800 m di spessore, in genere affiorante nelle zone più scoscese e dirupate.

Sopra il Calcare Massiccio si passa ad una successione pelagica ed emipelagica che comprende diverse formazioni, ben stratificate, di età compresa tra il Giurassico inferiore e l'Eocene, per uno spessore totale variabile da 900 fino a oltre 1500 m. La successione ha litologia prevalentemente calcarea, con una frazione silicea e argillosa abbondante in alcune unità stratigrafiche.

Le formazioni giurassiche della successione pelagica hanno frequenti e significative differenze laterali di spessore e di facies, in conseguenza di un'attività tettonica distensiva che aveva disarticolato i fondali marini, creando zone di alto strutturale (successioni condensate) con sedimentazione differenziata rispetto ai bacini deposizionali più profondi (successioni complete). I caratteri litologici sono invece più uniformi nella parte superiore della successione pelagica, anche se permangono differenze di spessore all'interno delle stesse unità sedimentarie nelle diverse zone di affioramento.

La trasformazione dell'area in catena montuosa a pieghe e sovrascorimenti iniziò nel Miocene superiore in risposta ad un regime compressivo, instauratosi in seguito ai movimenti convergenti delle placche africana ed europea che hanno portato alla chiusura del preesistente bacino marino; l'attività orogenica interessò precocemente la regione alpina e le regioni occidentali della catena appenninica, dopodiché, migrando progressivamente verso est, ha

coinvolto l'area marchigiana alla fine del Miocene.

Il sollevamento delle catene montuose ha innescato processi di erosione, determinando la produzione di ingenti quantitativi di detriti che si riversavano verso le aree limitrofe in cui permanevano ancora gli ambienti marini. Per questa ragione, a partire dall'Oligocene e più marcatamente nel Miocene, nella regione marchigiana si ebbe un aumento della frazione argillosa nei sedimenti a scapito di quella carbonatica, con deposizione di rocce a litologia maronosa.

Alla fine del Miocene la sedimentazione divenne puramente detritica, con rocce di litologia pelitica ed arenacea, fino a che anche la regione marchigiana venne coinvolta nel sollevamento tettonico, che causò la progressiva emersione dal mare. In questo periodo si delinearono le strutture montuose che costituiscono l'ossatura dell'attuale dorsale appenninica. Durante il sollevamento della catena le rocce sono state sottoposte a processi di compressione tettonica e hanno subito intense deformazioni, originando pieghe e faglie.

Le due dorsali montuose tagliate dal Fiume Potenza corrispondono a strutture antiformi sovrascorse ad est sui terreni miocenici, ma hanno una struttura parzialmente differente. La dorsale interna è interessata da un'intensa deformazione plicativa, e comprende più pieghe minori, associate a faglie inverse e sovrascorimenti. La dorsale esterna ha nell'area di studio una struttura più regolare, ed è formata da un'unica ampia anticlinale.

PLIOCENE E QUATERNARIO

Al termine del Miocene, dopo l'emersione dal mare, nella catena sono iniziati i processi di degradazione meteorica che ne hanno pro-

dotto il parziale e progressivo smantellamento, mentre ambienti marini sopravvivevano ad est nell'attuale fascia collinare periadriatica. Il processo di modellamento ad opera degli agenti atmosferici è continuato per oltre due milioni di anni in condizioni via via differenti fino a produrre la caratteristica conformazione del paesaggio attuale, in cui dorsali montuose con aree di vetta relativamente dolci ed arrotondate si raccordano tramite versanti più ripidi al fondovalle.

Le prime fasi di questa storia evolutiva sono testimoniate da superfici di erosione poste a diverse altezze per effetto del progressivo sollevamento della catena; le più antiche sono alla sommità di dorsali montuose e rilievi collinari, mentre superfici più recenti si trovano lungo i versanti montuosi. Queste antiche superfici sono evolute nel Pliocene e nella prima parte dell'Era Quaternaria, il Pleistocene inferiore, inizialmente in condizioni climatiche sub-aride, con processi erosivi che si sviluppavano in senso areale. Dopo il passaggio a condizioni climatiche più umide si sono originate per processi di erosione fluviale le superfici sottostanti. Il paesaggio risultante era ben differente da quello attuale, con vallate ampie e forme dolci e ondulate, oggi parzialmente conservate nelle parti sommitali a morfologia dolce delle dorsali montane.

Queste antiche superfici sono state progressivamente distrutte e disarticolate a partire dalla fine del Pleistocene inferiore, circa 700.000 anni fa, quando il sollevamento tettonico più rapido dell'intera regione ha incrementato il potere erosivo dei corsi d'acqua, causando un forte approfondimento dei sistemi idrografici e la creazione di valli strette, profonde e con ripidi versanti (Ambrosetti *et al.*, 1982; Bartolini *et al.*, 2003; D'Agostino *et al.*, 2001). È in questo contesto che i fiumi hanno inciso le

loro attuali vallate, con pronunciato profilo a "V", all'interno delle paleosuperfici.

Nel periodo successivo (Pleistocene medio e superiore) l'azione erosiva dei fiumi ha fortemente risentito delle oscillazioni climatiche, con un'alternanza di periodi con clima freddo (fasi glaciali) e più temperato (fasi interglaciali). Durante le fasi fredde, la scarsa copertura vegetale favoriva la produzione di detriti, che si accumulavano sui versanti e nei fondovalle, originando estese coltri detritiche tuttora conservate sui versanti montuosi. Nei periodi più miti lo sviluppo di estese coperture boschive riduceva l'apporto di detriti dai versanti, cosicché nei fondovalle l'attività erosiva delle acque correnti prevaleva sui processi di sedimentazione.

Nella valli fluviali, l'alternarsi di periodi con prevalente erosione o deposizione ha interagito con il sollevamento tettonico dell'area; le antiche pianure alluvionali sono state così distrutte nelle successive fasi erosive, e solo alcuni lembi di questi depositi fluviali, preservati dall'erosione fluviale, si sono conservati a diversa altezza sui fianchi delle valli, producendo caratteristici terrazzamenti.

Nell'Olocene, che comprende gli ultimi 11.700 anni dopo l'ultima glaciazione, l'evoluzione del paesaggio è continuata con modalità simili, interferendo sempre più con l'attività umana. A questo periodo è riferibile anche l'instaurarsi di bacini lacustri nella parte superiore del corso del Fiume Potenza, a monte di Pioraco, oggi colmati per la sedimentazione di notevoli quantità di depositi fini, che conferiscono all'alta valle del Potenza la tipica morfologia a fondo piatto.

Caratteri idrogeologici regionali

UNITÀ LITOSTRATIGRAFICHE E COMPLESSI IDROGEOLOGICI

Le dorsali montuose sono interamente formate dalle unità calcaree e calcareo marnose della successione umbro-marchigiana (Fig.1), le cui caratteristiche idrogeologiche generali sono ben note (Fossa Mancini, 1916; Centamore *et al.*, 1976; Nanni, 1991; Nanni & Vivalda, 2005). Alcuni Autori hanno approfondito i rapporti tra la litologia e lo sviluppo del carsismo ipogeo (Passeri, 1972; Cattuto & Passeri, 1974; Galdenzi, 1988, 1996). All'interno della successione sedimentaria si distinguono più complessi idrogeologici, gruppi di formazioni che hanno simili caratteri di permeabilità.

Calcare Massiccio – Questa unità ha un elevato spessore, valutato intorno ai 700-800 m, ed è formata da calcari del Giurassico iniziale, piuttosto puri ($\text{CaCO}_3 > 98\%$), stratificati a grosse bancate. Il Calcare Massiccio ha un'alta permeabilità dovuta sia ai pori singenetici che alla fitta rete di fratture e faglie che tagliano le bancate calcaree, e nella parte superiore può contenere alcuni orizzonti poco cementati, ad elevata porosità intergranulare. Ospita le più importanti falde idriche della regione montana.

Depositi pelagici giurassici – Si tratta di un insieme di rocce ben stratificate con litologia e spessore molto variabili sia lateralmente che verticalmente a causa della tettonica distensiva sinsedimentaria; si distinguono due tipi principali di successioni, quelle complete e quelle condensate.

Le successioni complete sono formate in successione da Corniola, Rosso Ammonitico, Calcari a Posidonia e Calcari Diaspri e comprendono orizzonti calcarei, marnosi e silicei, con uno spessore totale di alcune centinaia di metri, con rile-

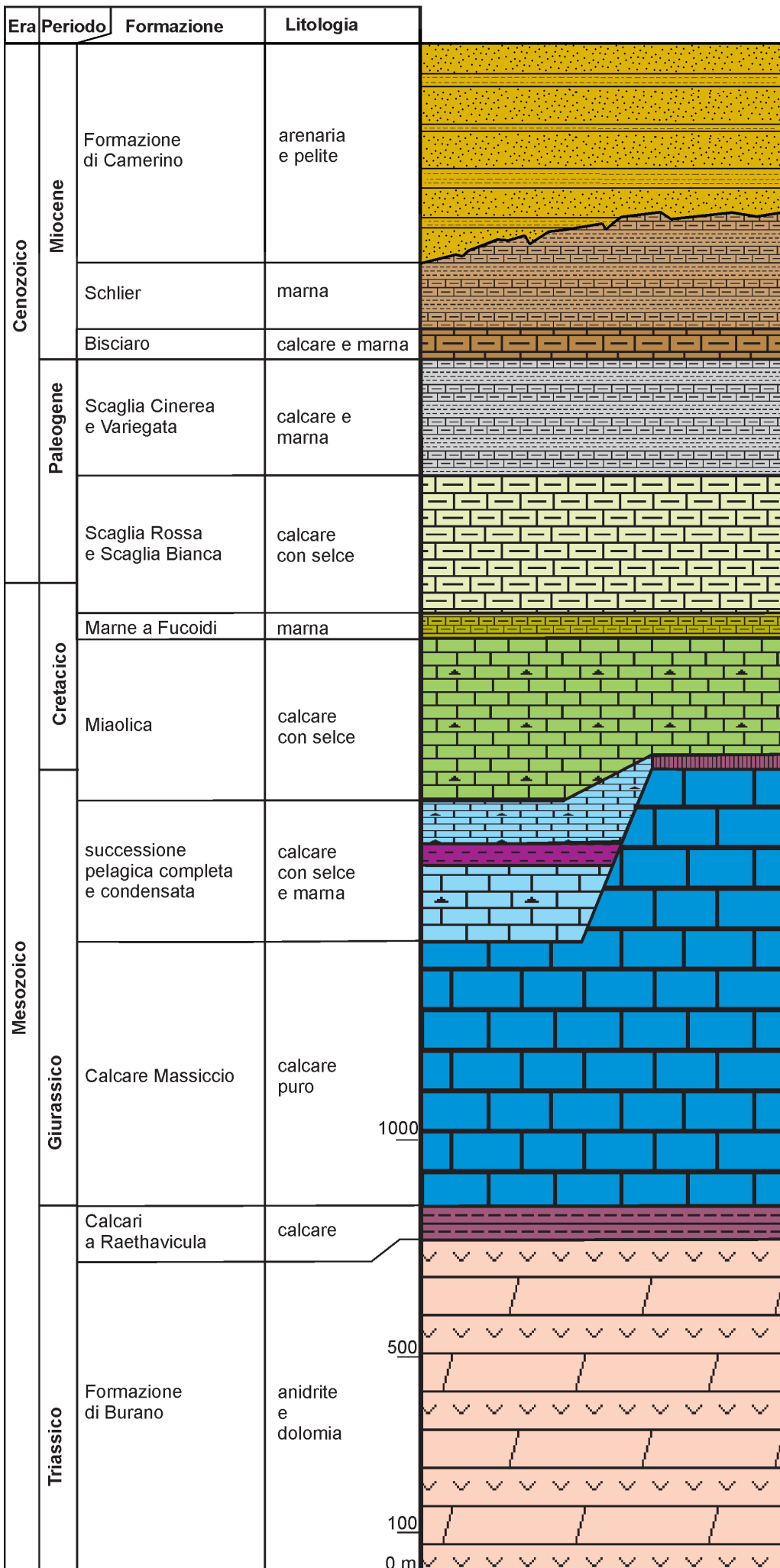
vanti variazioni locali. La Corniola è formata da calcari selciferi ben stratificati con permeabilità medio alta per fratturazione, ed è in connessione idraulica con il Calcare Massiccio, su cui poggia in continuità stratigrafica o per contatto tettonico su faglie sinsedimentarie. Le marne del Rosso Ammonitico e gli altri livelli a bassa permeabilità contenuti nella parte superiore dei Calcari Diaspri impediscono la continuità idraulica tra Calcare Massiccio-Corniola e la sovrastante unità calcarea (Maiolica).

Le successioni condensate hanno spessori inferiori ai 50 m, sono formate in prevalenza da calcari stratificati molto compatti e poco permeabili; localmente contengono livelli marnosi e silicei. Le successioni condensate rappresentano una barriera di permeabilità con importanza solo locale, interposta tra Calcare Massiccio e Maiolica.

Maiolica – La Maiolica è composta da calcari selciferi bianchi del Cretacico inferiore, ben stratificati, con spessore variabile dai 100 ai 350 m in diretta relazione con la potenza dei depositi giurassici sottostanti. È dotata di permeabilità medio-alta, legata ai giunti di strato ed ai sistemi di fessurazione.

Marne a Fucoidi – Le Marne a Fucoidi formano un orizzonte continuo in tutta la regione umbro-marchigiana e rappresentano il più importante livello a bassa permeabilità (acquicludo) all'interno della successione calcarea. Si tratta di marne e argille marnose policrome, per uno spessore complessivo di circa 50 m. Le Marne a Fucoidi non sono carsificabili, ma influenzano i drenaggi sotterranei e di conseguenza lo sviluppo e l'andamento delle cavità carsiche. Molte sorgenti all'interno delle dorsali sono ubicate in prossimità dei loro affioramenti.

Scaglia Bianca e Scaglia Rossa –



Queste unità sono formate da calcari e calcari marnosi con livelli selciferi, di età compresa tra il Cretacico e l'Eocene, ed hanno uno spessore variabile da circa 200 a 450 m. La Scaglia è permeabile per fessurazione. Rispetto alla Maiolica, ha un maggior contenuto argilloso, in particolare nella parte basale e in quella superiore.

Scaglia Variegata e Scaglia Cinerea – Con queste formazioni, la cui età va dall'Eocene a tutto l'Oligocene, si passa a rocce prevalentemente marnose, di bassa permeabilità. Insieme alle sovrastanti unità marnose mioceniche costituiscono l'acquicluda superiore della successione carbonatica. La minor resistenza meccanica fa sì che abbiano subito un'intensa erosione selettiva e che affiorino principalmente ai margini delle strutture calcaree carsificabili e nelle aree collinari circostanti.

LA CIRCOLAZIONE SOTTERRANEA

Nella successione sedimentaria le intercalazioni di marne poco permeabili consentono la formazione di falde idriche distinte nei diversi complessi idrogeologici. L'andamento discontinuo degli acquicludi, deformati dalle strutture plicative e tagliati da importanti sistemi di faglie sia di tipo compressivo che distensivo, permette tuttavia il realizzarsi di connessioni idrauliche tra i diversi acquiferi, rendendo più complessa la circolazione delle acque sotterranee.

Nelle dorsali montuose si formano piccole falde idriche di importanza locale all'interno di un singolo complesso idrogeologico, ma anche falde di importanza regionale alimentate da formazioni appartenenti a diversi complessi idrogeologici ed estese a larga parte della struttura geologica.

Le falde idriche minori si sviluppano nei complessi di Maiolica e Scaglia ed hanno bacini di alimentazione poco estesi, fino ad alcuni km², con

emergenze localizzate sui fianchi delle dorsali montuose, a quote maggiori rispetto al livello di base locale. La portata di queste sorgenti è bassa, fino a pochi L/s, ed è generalmente soggetta a forti variazioni stagionali (Nanni, 1991). Le sorgenti sono di due principali tipologie: sorgenti di strato, generalmente nella zona assiale delle strutture anticlinali, e sorgenti per soglia di permeabilità, sui fianchi delle pieghe, con strati verticali o fortemente inclinati.

Le falde idriche regionali si sviluppano generalmente nel Calcare Massiccio al nucleo delle strutture anticlinali, e sono alimentate anche da travasi di acque dagli acquiferi minori di Scaglia e Maiolica. Il livello piezometrico è regolato dalla rete idrica principale di fondovalle, verso cui le falde restituiscono consistenti apporti di acque sorgive con ricarica diffusa lungo l'alveo (sorgenti lineari di Boni *et al.*, 1986). Queste falde risentono in maniera limitata di variazioni stagionali di livello, portata e chimismo a causa dei lunghi tempi di permanenza delle acque nel sottosuolo e di una circolazione che si svolge in prevalenza su sistemi di fratture o porosità della roccia. Il chimismo può risentire dell'interazione con acque di composizione solfato-clorurata che hanno seguito circuiti relativamente profondi (Nanni & Vivalda, 1999).

Le modalità della circolazione idrica sotterranea nelle rocce solubili, come i calcari, sono fortemente influenzate dai processi carsici, che determinano un allargamento per corrosione chimica degli spazi porosi e, di conseguenza, un aumento della permeabilità e della velocità di deflusso nel corso del tempo. In linea generale, le rocce calcaree nelle dorsali montuose marchigiane hanno un'alta permeabilità per carsismo che consente una facile infiltrazione ed un rapido trasferimento verso il basso delle acque nel sottosuolo.

La dorsale di Monte Lago: Le Acque Sotterranee

La struttura geologica

L'area studiata si trova nella dorsale umbro-marchigiana interna e comprende il tratto della catena compreso tra la valle del Fiume Potenza a nord e i bordi meridionali del Piano di Monte Lago. Il Fiume Potenza taglia in senso trasversale la dorsale, formando insieme al suo importante affluente Scarzito la profonda incisione valliva in cui si trovano gli abitati di Pioraco, Sefro e Fiuminata a quote di poco superiori ai 400 m. Superata Pioraco, la valle diviene più stretta, con alcuni tratti a forra, prima di entrare nella fascia collinare.

La struttura montuosa è formata dalle rocce della successione carbonatica, disposte in una struttura antiforme complessa delimitata verso Est dal sovrascorrimento M. Primo - M. Cavallo rispetto ai depositi miocenici della Sinclinale di Camerino (Calamita & Pierantoni, 1993). Nel dettaglio si riconoscono tre anticlinali maggiori separate da strutture sinformi di varia complessità. Le anticlinali sono bordate ad est da faglie inverse o sovrascorrimenti, con rigetti inferiori nelle pieghe più interne, dove al *footwall* si trovano unità calcaree cretaceo-paleogeniche. La maggiore struttura sinforme si estende nella parte esterna della dorsale ed ha una geometria complessa; è formata da un insieme di pieghe minori e su di essa si sviluppa la depressione morfologica in cui si trovano i Piani di Monte Lago (Fig.2). La struttura geologica è tagliata dalle valli del F. Potenza e del T. Scarzito in senso trasversale, ma in alcuni

tratti i fiumi subiscono variazioni di direzione dovute alla natura litologica delle rocce attraversate.

Le sorgenti

La giacitura degli orizzonti marnosi intercalati alla successione carbonatica o posti al letto dei sovrascorrimenti influenza il drenaggio delle acque sotterranee nelle unità permeabili e l'ubicazione delle numerose sorgenti, di diversa importanza (Fig.2). La formazione di importanti acquiferi di base è favorita dalla possibilità di scambi idrologici tra le diverse strutture, facilitati dalla scarsa continuità delle unità giurassiche e dalle deformazioni subite dalle rocce per strutture di tipo plicativo o per faglia, con rigetti elevati.

Le sorgenti maggiori sono nelle valli dei fiumi, dove questi tagliano il nucleo delle strutture anticlinali fino a raggiungere le unità giurassiche del Calcare Massiccio-Corniola (Sorgente Bagno, San Giovanni, e sorgenti di M. Primo a Pioraco). Queste sorgenti sono alimentate da importanti falde idriche che assicurano un flusso di base al nucleo delle dorsali montuose ed hanno un'area di ricarica estesa ad ampi settori della dorsale. La quota di emergenza delle acque è vicina al livello locale di base, ed è controllata principalmente dalla quota di scorrimento dei fiumi nelle valli.

Un altro gruppo di sorgenti si trova sul versante orientale della dorsale, presso il fronte di sovrascorrimento

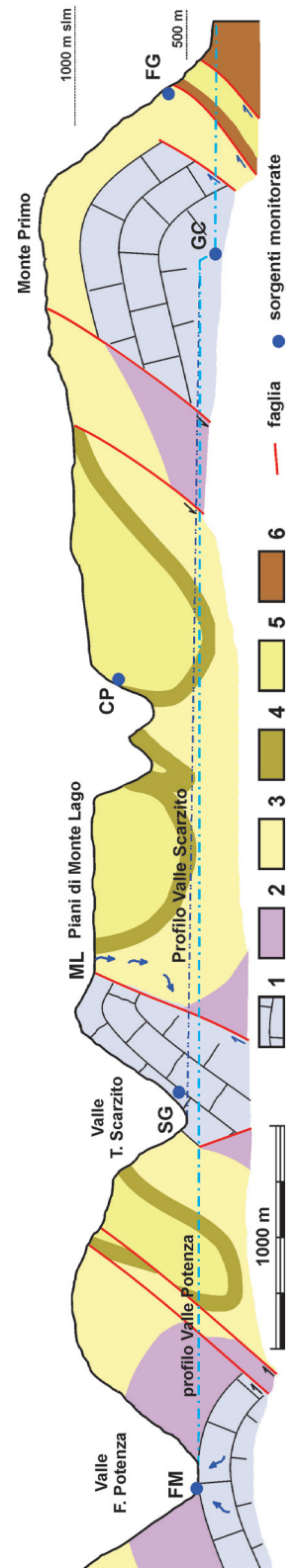


Fig. 2

delle unità calcaree sui terreni marinosi miocenici, dove i ripidi solchi vallivi che incidono i versanti abbassano le soglie di permeabilità. Questi acquiferi sono spesso compresi entro unità poco permeabili sul fianco delle pieghe, ed il livello idrico può rimanere sensibilmente elevato rispetto alle valli principali. Altre sorgenti con portate significative si trovano nelle strutture sinclinali interne, mentre sorgenti minori sono sorrette dagli affioramenti di marne giurassiche e cretache sui versanti montuosi, fino anche a quote elevate.

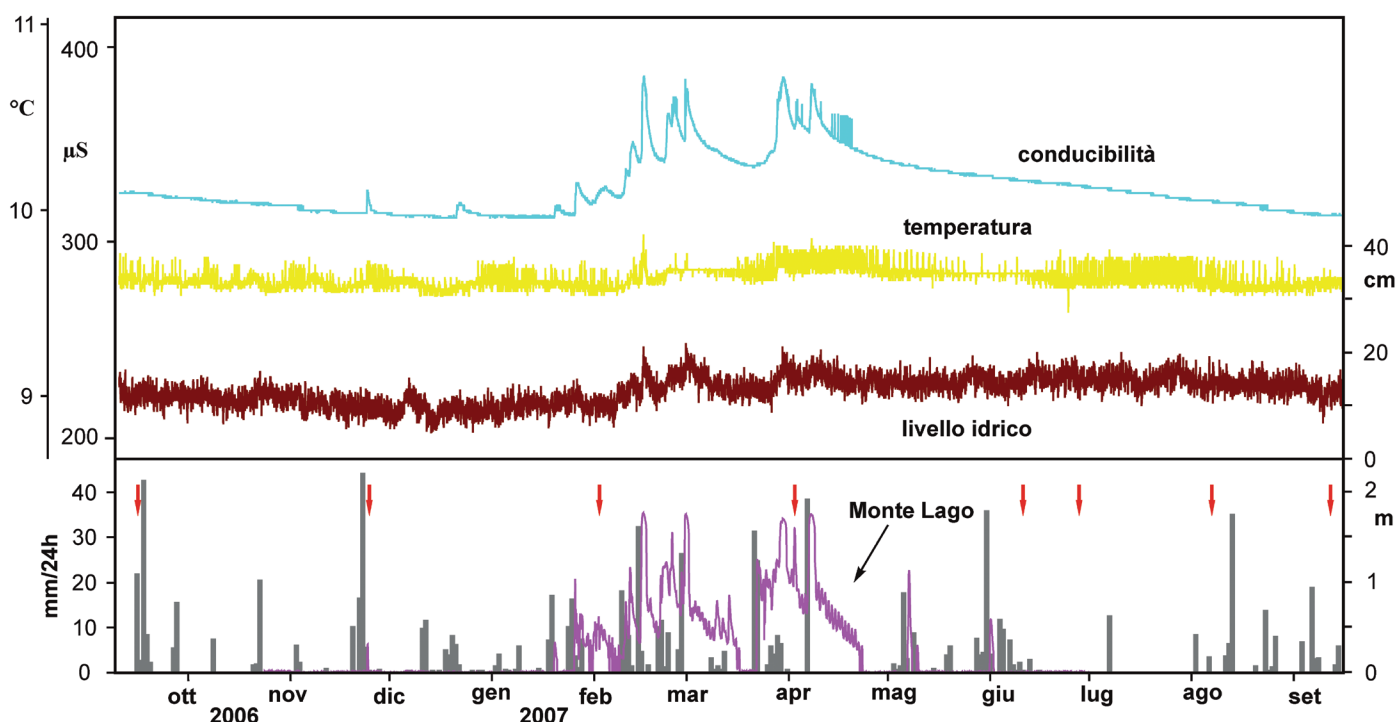
La circolazione idrica sotterranea, oltre che il substrato calcareo, coinvolge anche le coperture detritiche, spesso poco cementate ed altamente permeabili. Questi acquiferi hanno generalmente scarsa importanza nei versanti montuosi, a causa dell'esiguo spessore e della scarsa continuità laterale dei depositi, mentre possono assumere una certa importanza nel fondovalle se il materasso alluvionale raggiunge spessori significativi. Nella zona di Fiuminata acquiferi di questo tipo alimentano polle sorgive con portata piuttosto regolare, note con il termine "Stoni" e già descritte da Canavari (1928) e poi da Deiana & Dramis (1972). Gli

Stoni si aprono ai margini della pianura alluvionale del Fiume Potenza, dove le acque sotterranee della falda di fondovalle, ospitata in detriti grossolani, viene superiormente confinata da sedimenti fini, non permeabili. La risalita dell'acqua avviene grazie alla pressione idrostatica attraverso condotti verticali profondi fino a oltre 10 m che si sviluppano nei depositi detritici ed alluvionali.

Il monitoraggio

Cinque sorgenti rappresentative dei diversi tipi di acquiferi sono state monitorate per un periodo di un anno, dal settembre 2006 al settembre 2007. Sono state monitorate le sorgenti maggiori, e tra quelle minori, sono state preferite quelle vicine ai Piani di Monte Lago (Fig. 3.1). Nelle località prescelte sono stati installati logger remoti per la registrazione di dati relativi a temperatura, livello idrico e conducibilità con frequenza oraria (Tab.1). Oltre alle sorgenti sono stati monitorati anche livello idrico e temperatura presso l'inghiottitoio del Piano di Monte Lago ed i parametri chimici nelle acque del Fiume Potenza, in una stazione di prelievo ubicata a valle di Pioraco.

Fig. 3



	Temperatura	Livello idrico	Conducibilità	Chimismo
Sorgente del Castoro (Pioraco)	X	X	X	X
Sorgente Bagno (Fiuminata)	X	X	X	X
Sorgente di Figareto (Selvazzano)	X		X	X
Sorgente San Giovanni (Sefro)	X	X	X	X
Grotta Piccola di Caprelle (Agolla)	X	X	X	X
Inghiottitoio di Monte Lago	X	X		X
Fiume Potenza (Pioraco)				X

In tutti i siti sono stati prelevati durante il periodo di monitoraggio otto campioni per analisi chimiche ed isotopiche. La validità dei dati acquisiti dai logger è stata verificata tramite controlli strumentali indipendenti effettuati all'atto dei campionamenti e in laboratorio. Nella Sorgente Bagno l'esecuzione di lavori di muratura protrattisi per un paio di mesi ha reso necessario spostare in corso d'opera la posizione del sensore ed il sito di prelievo dei campioni. I dati relativi ai livelli idrici riportati nei grafici sono stati opportunamente corretti.

Le analisi chimiche delle acque sono state effettuate presso l'Università di Camerino, Scuola di Scienze del Farmaco e dei Prodotti della Salute, dal Centro Ricerche Scienze Igienistiche e Sanitarie Ambientali. Le analisi isotopiche sono state invece effettuate presso i laboratori: Iso-Analytical Limited, Sandbach, Cheshire, Gran Bretagna; Vrije Universiteit, Amsterdam, Paesi Bassi; University of Tsukuba - Ibaraki - Giappone.

In base alle risultanze sperimentali si è deciso di ripetere il monitoraggio dei parametri fisici delle acque per una migliore valutazione dei rapporti tra l'inghiottitoio di Monte Lago e le sorgenti di Valle San Giovanni. Il monitoraggio è stato esteso ad un'ulteriore emergenza temporanea, individuata durante i rilievi geologici. Questo supplemento delle attività, originariamente previsto per l'inverno 2008-09, è stato rimandato al 2010 per difficoltà burocratiche in-

sorte all'atto dell'installazione degli strumenti di misura. Uno degli strumenti collocati nelle polle sorgive temporanee ha restituito i dati fino a maggio 2010, dopodiché ha cessato di funzionare, monitorando tuttavia quasi per intero il periodo di attività idrica.

I dati acquisiti sono stati integrati con i valori di piovosità raccolti nelle stazioni di Pioraco e Sorti (Sefro), tratti dagli Annali Idrologici della Regione Marche. Nell'elaborazione dei grafici sono stati inseriti i valori raccolti nella stazione di Sorti, più vicina alle aree di alimentazione delle sorgenti e più chiaramente correlabile alle variazioni monitorate nei parametri idrologici. Il dato relativo al forte evento piovoso del 4 aprile 2007, mancante nella sequenza pubblicata, è stato sostituito con il valore misurato a Pioraco. Il periodo di osservazione (8 settembre 2006 - 12 settembre 2007) è stato sfavorevole dal punto di vista idrologico per la perdurante siccità; sono stati misurati 863 mm di precipitazioni totali nella stazione di Sorti e 593 mm in quella di Pioraco, ben al di sotto delle medie annuali nelle due località.

Inghiottitoio di Monte Lago

Le acque sono state campionate appena a monte dell'inghiottitoio principale, nella stessa località in cui è stato posto lo strumento per la registrazione dei livelli idrici. Per esigenze logistiche il data logger è stato collocato nella dolina al bor-

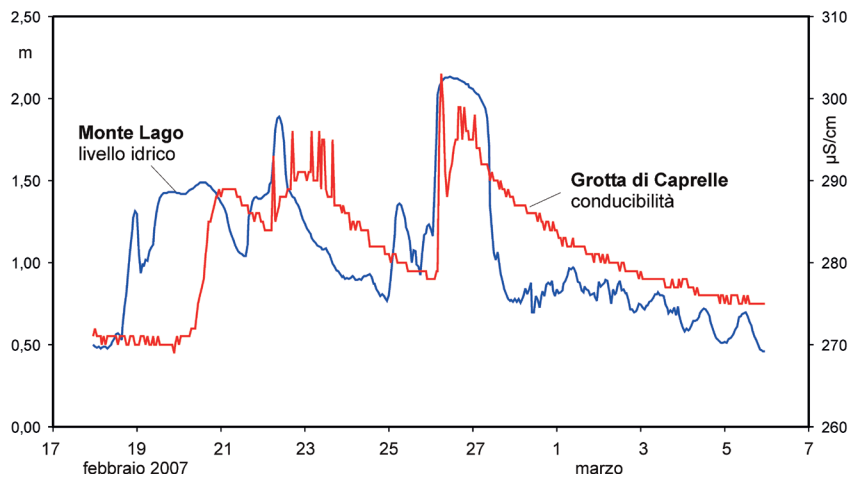


Fig. 4

do dell'inghiottitoio, poco al di sopra del livello di magra delle acque. Esso pertanto non ha fornito dati nei periodi di magra, ma ha registrato gli aumenti di livello che si producono ogni qual volta l'afflusso di acque non viene smaltito dall'inghiottitoio. Il sensore ha registrato livelli idrici per oltre metà del periodo di osservazione. Lo scorrimento idrico comunque è continuato per un periodo più lungo, e solo durante la stagione estiva il deflusso verso l'inghiottitoio si è interrotto.

I livelli idrici sono risaliti di oltre 2 m in occasione di periodi piovosi o per lo scioglimento delle nevi. Da notare che isolate forti piogge in estate e ad inizio autunno non hanno prodotto variazioni di livello registrabili a causa della forte evaporazione che riduce l'entità di scorrimento ed infiltrazione.

I dati relativi al livello idrico nei Piani di Monte Lago, insieme a quelli relativi alla piovosità, sono riportati per confronto nei grafici relativi ad ogni località. Il livello del lago, influenzato da piogge, scioglimento neve e dall'intensità dei processi di evapo-traspirazione, fornisce una valutazione sull'entità dell'infiltrazione concentrata nei Piani e, indirettamente, anche sull'infiltrazione diffusa nelle dorsali montuose.

GROTTA PICCOLA DI CAPRELLE

Una piccola sorgente è ubicata una decina di metri sotto l'ingresso della Grotta Piccola di Caprelle, a 795 m di altitudine, ben al di sopra del livello di base locale. L'acqua sgorga sul letto di una stretta valle alla base di un cono detritico ed è alimentata dalla grotta, interamente sviluppata nella Scaglia Bianca. Nella grotta l'acqua scorre tra i detriti del pavimento, formando un corso a pelo libero solo nella parte terminale ed in una zona depressa tra i detriti, in cui è stata posta la stazione di misura e di campionamento.

I dati raccolti evidenziano una notevole stabilità della temperatura, con valori compresi tra 9,5 e 9,8 °C (media 9,6 °C); i valori di conducibilità misurati, oscillano tra 310 e 385 µS/cm (Fig.3). Le oscillazioni di livello sono risultate di piccola entità, non superiori a 10 cm, ma sono comunque significative trattandosi di flusso turbolento. Il trend stagionale dei diversi parametri è perfettamente sovrapponibile. Livello idrico, temperatura e conducibilità hanno raggiunto valori minimi da metà dicembre a fine gennaio, dopodiché gli apporti delle precipitazioni invernali hanno causato un innalzamento di tutti i valori. Al termine della stagione piovosa, i valori di conducibilità si sono lentamente abbassati, ritornando ai valori minimi soltanto alla fine dell'estate, con un andamento assimilabile ad una curva di esaurimento. Le piogge dal periodo tardo primaverile all'autunno non hanno prodotto cambiamenti nei parametri monitorati, con l'eccezione dell'evento di fine novembre, in occasione del quale è stato registrato un lieve aumento della conducibilità.

Si può riconoscere una generale rispondenza tra le variazioni del livello idrico nei Piani di Monte Lago ed il

trend stagionale dei parametri idrici nella grotta, in particolare per la conducibilità. Nel dettaglio si rilevano però importanti differenze: gli eventi piovosi del periodo tardo primaverile hanno causato l'innalzamento del livello idrico nel bacino di Monte Lago senza produrre variazioni apprezzabili nella sorgente; la risposta agli eventi atmosferici negli idrogrammi dei Piani e della sorgente è inoltre differita nel tempo, con ritardo che può superare le 24 ore (Fig.4); gli apporti di acque invernali producono un innalzamento della temperatura nelle acque sorgive, contrariamente a quanto ci si potrebbe attendere qualora le fredde acque superficiali defluissero direttamente dall'inghiottitoio verso la grotta. Questi elementi fanno ritenere che eventuali contributi di acque dall'inghiottitoio di Monte Lago abbiano un ruolo secondario nell'alimentazione della sorgente.

SORGENTE DI FIGARETO

Questa piccola sorgente, captata per uso idropotabile, si trova a ~610 m di altitudine sul fianco orientale della dorsale montuosa presso l'abitato di Selvazzano, in un solco vallivo che incide il versante. La zona è fortemente tettonizzata in prossimità del sovrascorrimento di Monte Primo – Monte Cavallo, e distinti pacchi di strati calcarei (Scaglia s.l.) sono interposti

a livelli marnosi della Scaglia Cinearea. Sono proprio le unità marnose a sostenere piccole falde idriche che alimentano un gruppo di sorgenti, tra cui quella di Figareto è l'emergenza a quota superiore. L'opera di captazione consiste in un pozzo scavato nel solco vallivo all'interno dei riempimenti detritici, entro cui filtrano le acque provenienti dalle unità calcaree. La sorgente risente fortemente di variazioni stagionali, ed è l'unica tra quelle monitorate ad essersi completamente essiccata durante il periodo di monitoraggio (Fig.5).

La Sorgente di Figareto ha mostrato una maggiore variabilità rispetto a quella di Caprelle, sia nelle portata che nei parametri chimico-fisici. In particolare, la sorgente è risultata soggetta a totale prosciugamento nella stagione tardo autunnale e agli inizi dell'inverno 2007, prima che le precipitazioni invernali ripristinassero uno scorrimento idrico.

Le piogge invernali hanno causato rapide risposte della sorgente, con innalzamento della conducibilità associato a consistenti abbassamenti della temperatura. Questo comportamento evidenzia una più diretta relazione con l'afflusso di acque piovane fredde dalla superficie, probabilmente attraverso i detriti a matrice argillosa in cui si trova l'emergenza.

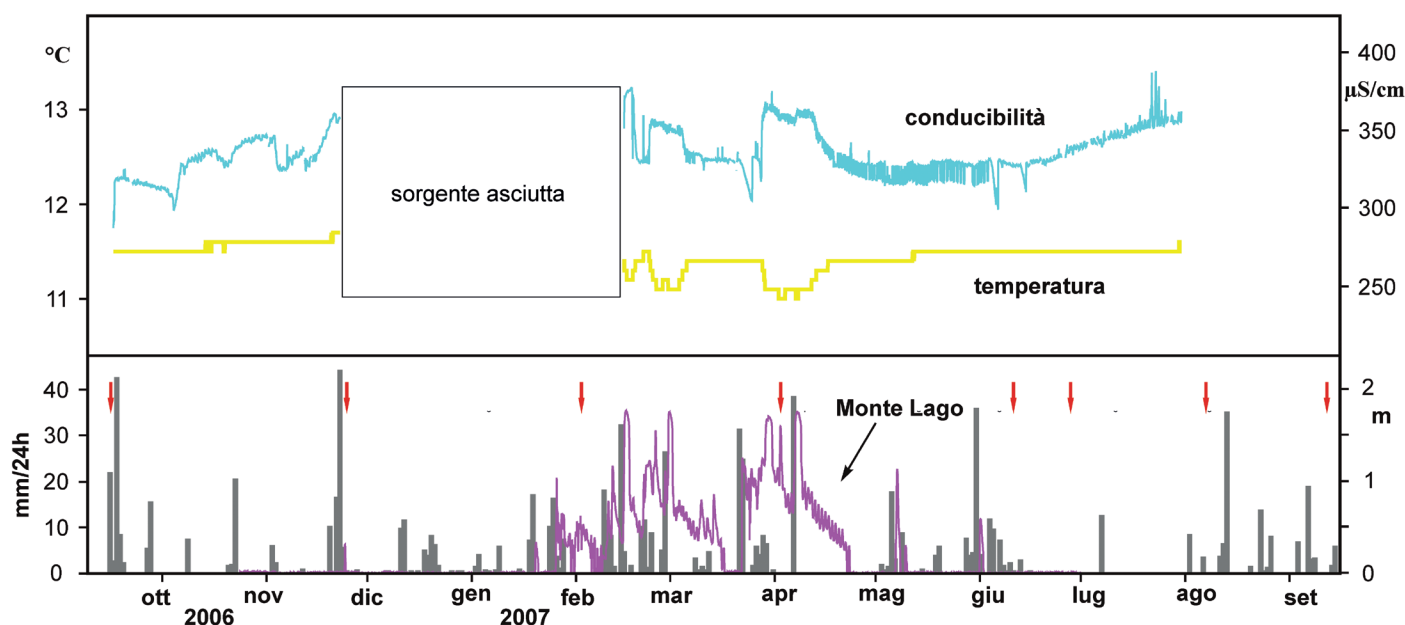


Fig. 5

Sorgenti acquifero di base

GROTTA DEL CASTORO

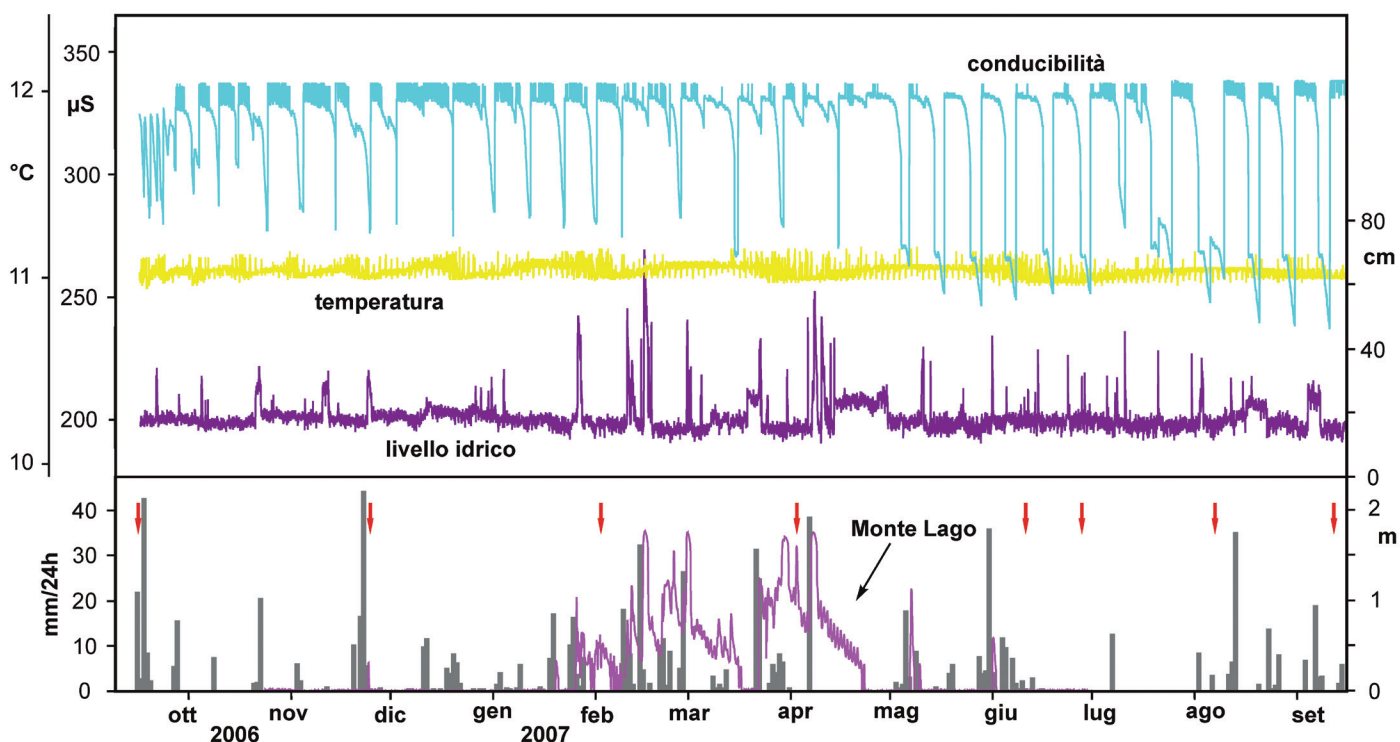
Questa sorgente si trova presso l'abitato di Pioraco, all'imbocco della gola scavata nel Calcare Massiccio, proprio sotto la serie di salti (~60 m di dislivello totale) che il Fiume Potenza crea superando la soglia creata dal corpo di travertino che ostruisce la valle. È la più importante tra le emergenze presenti nell'alveo fluviale lungo la gola ed alimentate direttamente dal Calcare Massiccio al nucleo della struttura anticlinale di Monte Primo. È possibile tuttavia che risenta di infiltrazioni dalle falde di subalveo di T. Scarzito e F. Potenza attraverso il sovrastante corpo di travertino, altamente permeabile.

L'acqua sgorga direttamente nell'alveo dall'ingresso naturale della Grotta del Castoro attraverso una galleria subacquea nei travertini, interamente percorsa dall'acqua che defluisce verso il fiume. La stazione di monitoraggio è stata posta nel lago della sala interna della grotta, raggiunto da una trivellazione attraverso cui sono prelevate acque utilizzate dalla sovrastante cartiera.

I dati acquisiti nella sorgente sono di difficile interpretazione, in quanto influenzati dall'interferenza tra il normale deflusso ed il pompaggio delle acque utilizzate dalla sovrastante cartiera (Fig.6). Ciò risulta particolarmente evidente per i valori di conducibilità che subiscono numerosi abbassamenti, per oltre 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ rispetto ai valori normali, forse in occasione di periodi di maggior pompaggio delle acque. Questi episodi non sono infatti correlabili né agli eventi meteorici né alle variazioni di livello. I differenti eventi hanno simile evoluzione, con un abbassamento dei valori misurati che diviene progressivamente più rapido, fino a raggiungere i minimi, per poi ritornare repentinamente ai valori precedenti. Tralasciando queste perturbazioni, il trend dei valori non disturbati mostra una notevole regolarità, con valori di ~330 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una sola leggera diminuzione durante i periodi di maggior piovosità.

I valori di temperatura sono abbastanza costanti, ~11 °C, con oscillazioni cicliche di pochissimi decimi difficilmente interpretabili. Anche i livelli idrici non hanno risentito di elevate variazioni, nonostante la grotta

Fig. 6



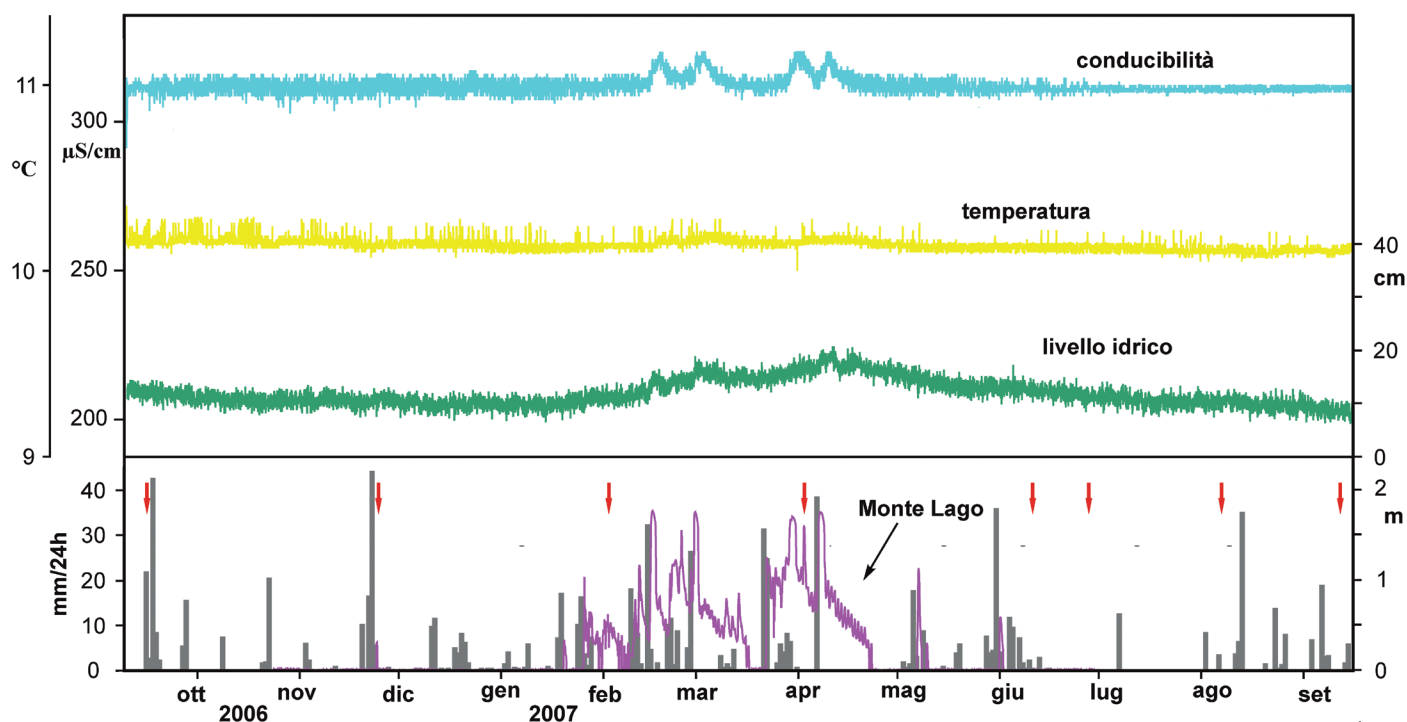


Fig. 7

sia in diretta connessione idraulica con il Fiume Potenza tramite un canale di ampie dimensioni. Le oscillazioni registrate sono piuttosto rapide e di breve durata, per incrementi massimi di 50 – 60 cm. Questi episodi sono correlabili con l'andamento meteorico superficiale, tranne che nel periodo estivo, quando compaiono alcuni picchi positivi di minore entità, non collegabili a specifici eventi. Non si è inoltre verificata diretta invasione delle acque fluviali attraverso la galleria carsica fino alla sala interna monitorata.

SORGENTE SAN GIOVANNI (SEFRO)

La Sorgente San Giovanni è la più importante emergenza dell'area, ed assicura in periodo di magra una portata di 40 L/s, captati per scopi idropotabili. La sorgente si trova al tetto del Calcare Massiccio nella parte inferiore dell'omonima valle, presso la confluenza con il Torrente Scarzito. I logger per il monitoraggio sono stati collocati nel bottino di presa, mentre i campioni per le analisi sono stati prelevati dal troppo pieno ubicato poco a valle.

Nella parte superiore della stessa valle si trovano altre emergenze su

Maiolica, con portata più irregolare e totalmente secche nella stagione estiva. Una di queste emergenze è stata monitorata in un successivo periodo, nel 2010. Prove con traccianti hanno inoltre verificato che in questa valle tornano in superficie le acque dall'inghiottitoio di Monte Lago, dopo brevissima permanenza del sottosuolo (Dramis & Deiana, comunicazione personale; Acquilanti *et al.*, 2013)

La Sorgente San Giovanni ha mantenuto in tutto il periodo una grande stabilità dei parametri chimico-fisici ed ha risentito debolmente di variazioni stagionali (Fig.7). Il trend stagionale dei parametri monitorati è simile a quello della Grotta Piccola di Caprelle, ma i singoli eventi meteorici hanno prodotto effetti fortemente attenuati.

I livelli idrici sono scesi ai valori minimi nel gennaio 2007, dopo di che sono aumentati in risposta alle piogge invernali, per raggiungere valori massimi agli inizi di aprile e ridiscendere lentamente. I valori di conducibilità si sono mantenuti sorprendentemente stabili durante tutto l'anno, con oscillazioni di pochissimi µS/cm. Soltanto i quattro maggiori eventi

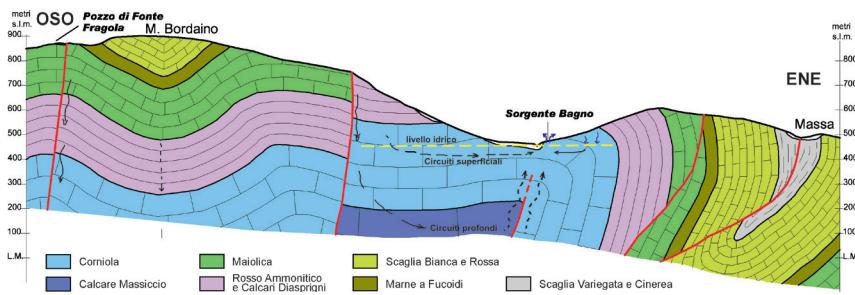


Fig. 8

meteorici superficiali hanno prodotto tra febbraio ed aprile piccoli temporanei aumenti dei valori. Gli eventi del 13 e 26 febbraio hanno causato un rapido aumento della conducibilità, con poche ore di ritardo rispetto al massimo livello nei Piani, mentre il picco nella conducibilità è stato raggiunto con un ritardo di 52-60 ore, con un incremento totale dei valori comunque non superiore a 10 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La temperatura è rimasta costante nell'intero periodo a $\sim 10,3^\circ\text{C}$, con aumenti appena percettibili in concomitanza con l'innalzamento dei valori di conducibilità.

La costanza dei parametri misurati è ben compatibile con un'origine delle acque dagli acquiferi di base, in cui il flusso lento e continuo delle acque dall'acquifero è solo parzialmente influenzato da apporti meteorici rapidi dei circuiti più superficiali. La sorgente, per quanto vicina ai Piani

di Monte Lago, non risente in maniera rilevante dei variabili contributi di acque dagli inghiottitoi.

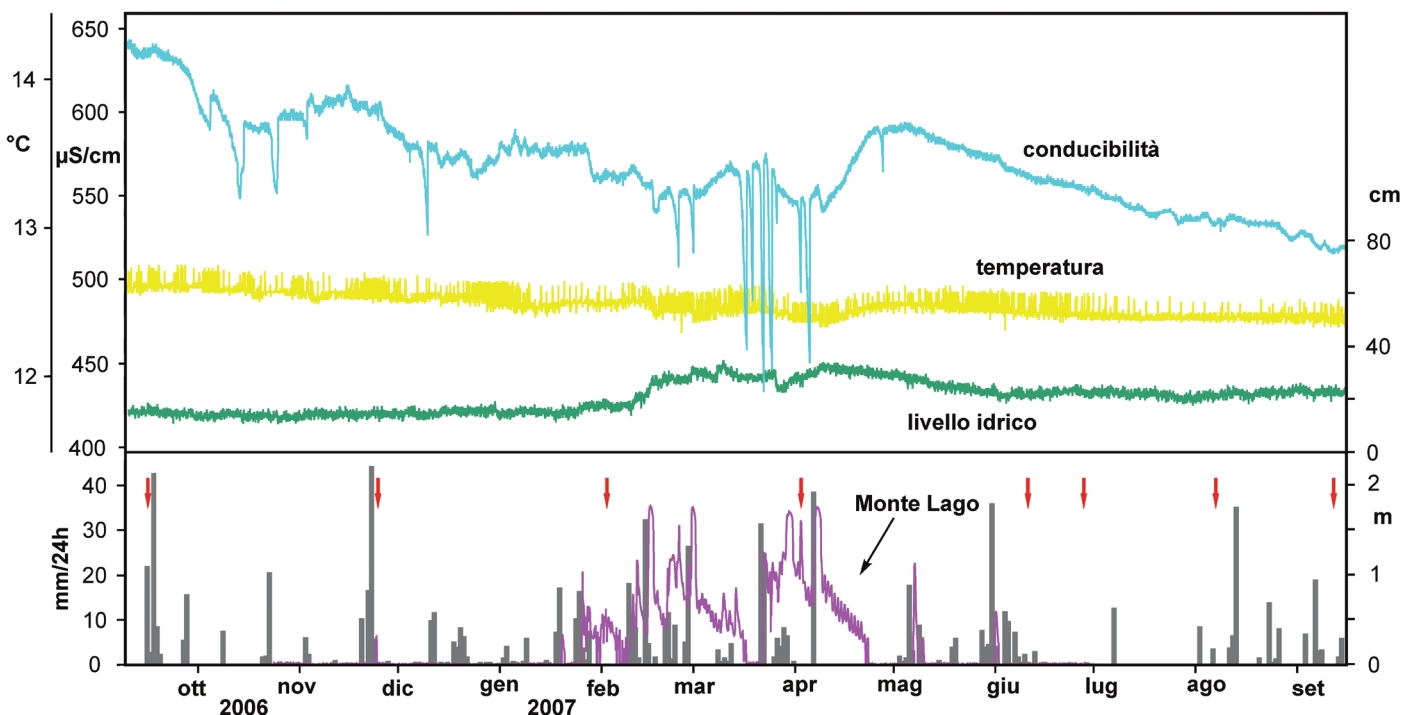
SORGENTE BAGNO

Questa sorgente si trova sulla riva sinistra del Fiume Potenza tra gli abitati di Spindoli e Massa (Fiuminata), ed ha una portata stimata in poche decine di L/s; le acque sono raccolte in diverse vasche e sollevate con delle pompe ad un serbatoio di raccolta.

La sorgente si trova a livello della piana alluvionale, dove la valle fluviale taglia il nucleo di un'anticlinale nei calcari giurassici della Corniola, in continuità idraulica con il sottostante Calcare Massiccio. L'acqua sorgiva ha un contenuto di acido solfidrico ed una più elevata mineralizzazione rispetto alle normali acque emergenti dalle dorsali montuose, probabilmente per apporti da circuiti più profondi, coinvolgenti le sottostante Formazione delle Anidriti di Burano (Fig.8).

Nonostante alcuni isolati abbassamenti dei valori di conducibilità probabilmente dovuti a perturbazioni nel sito di misura, si riconosce chiaramente un trend stagionale

Fig. 9



(Fig.9). Il livello idrico risente di un leggero incremento nel periodo primaverile, con ritardo rispetto alle precipitazioni meteoriche ed alle variazioni di livello idrico nei Piani di Monte Lago. La curva è simile a quella ottenuta a San Giovanni, ed entrambe sono compatibili con un aumento complessivo delle portate dopo le piogge invernali e di inizio primavera.

Le curve di conducibilità e temperatura seguono entrambe un trend discendente, differente rispetto a tutte le altre sorgenti monitorate, con variazioni di maggior ampiezza per la conducibilità. L'abbassamento dei valori di conducibilità è pronunciato ($\sim 80 \mu\text{S}/\text{cm}$) ed il trend si inverte solo in primavera, al termine della stagione piovosa. I dati chimici mostrano che i valori di conducibilità crescono in conseguenza di un sensibile aumento dei solfati disciolti, la cui alta concentrazione è legata ai flussi risalenti dal basso.

L'aumento di conducibilità e di temperatura misurato dopo la stagione piovosa può essere correlato all'influenza dell'alimentazione superficiale sulla circolazione profonda. Gli afflussi di acque meteoriche, innalzando il livello delle falde idriche determinano anche un incremento della pressione idrostatica, creando le condizioni favorevoli per la risalita di acque dai circuiti più profondi (Fig.8). Il trend discendente registrato nel restante periodo monitorato è interpretabile come una conseguenza del minor apporto di fluidi mineralizzati, associato alla prolungata siccità ed al conseguente abbassamento dei livelli piezometrici e del carico idrostatico.

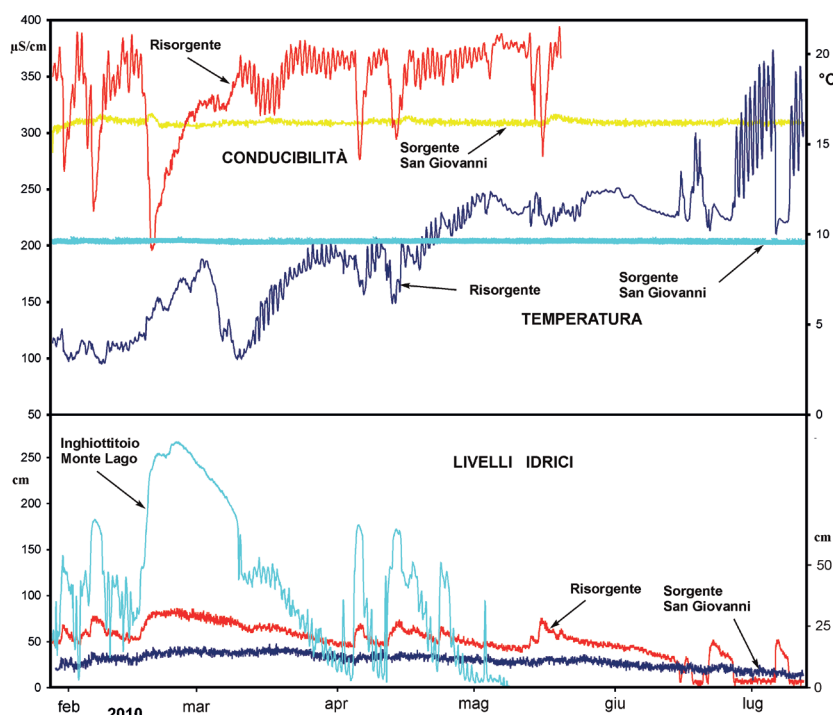


Fig. 10

Monitoraggio 2010 dei Piani di Monte Lago - Valle San Giovanni

Il monitoraggio idrologico è stato ripetuto nella Valle San Giovanni per verificare le relazioni esistenti con l'inghiottitoio di Monte Lago: in questa seconda fase, da gennaio a giugno 2010, sono stati monitorati livello idrico, temperatura e conducibilità nella Sorgente San Giovanni ed in una delle polle sorgive nella parte alta della stessa valle, mentre nell'inghiottitoio e nel ruscello presso le polle superiori sono stati acquisiti dati su livello e temperatura. Le abbondanti precipitazioni hanno determinato la risalita del livello idrico nei Piani, che sono rimasti occupati dal lago temporaneo per un periodo relativamente lungo. L'inghiottitoio si è mantenuto attivo fino all'estate, con piene minori fino al mese di giugno.

In tutto questo intervallo di tempo le perturbazioni indotte nella Sorgente San Giovanni si sono mantenute di bassa entità, come già osservato nel precedente periodo (2006/07), nonostante la maggior quantità di precipitazioni meteoriche (Fig.10).

Le nuove polle sorgive monitorate evidenziano un comportamento totalmente differente da quello della sorgente principale, come risulta chiaramente dal confronto dei relativi tracciati (Fig.10). Queste emergenze poste a quote più elevate hanno risentito in maniera diretta dell'andamento idrologico dei Piani di Monte Lago, con variazioni rapide e di elevata entità dei parametri monitorati. In particolare, la bassa temperatura delle acque sorgive, con valori scesi fino a 2,5 °C, denota un arrivo molto rapido di acque superficiali, attraverso canali carsici in cui si hanno scarsi scambi termici con la roccia. Nelle acque sorgive sono chiaramente riconoscibili i cicli diurni, che si manifestano con un ritardo di alcune ore. Anche i valori di conducibilità molto bassi sono compatibili con un basso contenuto salino, tipico di acque piovane o di fusione che non hanno interagito lungamente con il suolo o la roccia.

Queste osservazioni fanno ritenere che queste polle rappresentino una diretta risorgenza dei Piani di Monte Lago, attiva nei periodi di più elevata portata dell'inghiottitoio, e che il drenaggio sotterraneo avvenga attraverso gallerie carsiche sufficientemente grandi da consentire un rapido deflusso delle acque, senza che esse raggiungano un equilibrio termico con la roccia o incrementino

in maniera significativa il loro contenuto in sali disciolti.

Chimica acque

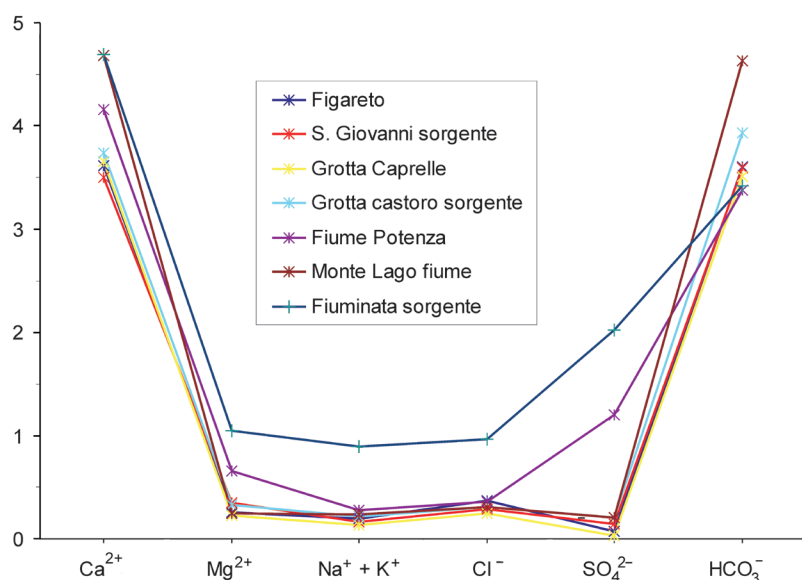
Le acque sorgive nelle sorgenti dell'area sono tutte di tipo bicarbonato-calcico con simile contenuto salino, ad eccezione delle acque della Sorgente Bagno, che hanno anche significativi contenuti di solfato (Tab.2 e Fig.11). L'analisi di dettaglio della composizione chimica e delle sue variazioni stagionali rivela comunque significative differenze anche tra le acque bicarbonatiche emergenti nelle sorgenti analizzate, ed in particolare tra quelle degli acquiferi di base (Castoro e San Giovanni) e quelle degli acquiferi minori (Caprelle e Figareto).

ACQUE BICARBONATICHE

I valori di residuo fisso sono bassi in tutte le acque, classificabili come oligominerali. I valori medi del residuo fisso sono compresi tra 205 e 211 mg/L, e risultano leggermente più alti solo nella Grotta del Castoro (230 mg/L). Anche la concentrazione dei principali ioni risulta molto simile, seppure un'analisi di dettaglio rivela che nelle acque della falda di base si ha un maggior quantità di ioni minori.

La sorgente di Caprelle, in particolare, ha contenuti estremamente bassi di solfati, che invece sono leggermente più abbondanti nella Sorgente Figareto (~3 mg/L) e soprattutto nelle sorgenti San Giovanni (~7 mg/L) e del Castoro (~10 mg/L). Andamento simile hanno anche le concentrazioni di altri ioni, come fluoruri, magnesio e stronzio. Queste differenze sono compatibili con la possibilità che le emergenze ubicate a quota inferiore siano contaminate con ioni provenienti da circuiti idrici più profondi che coinvolgono le unità evaporitiche triassiche alla base della successione carbonatica.

Fig. 11



Inghiottoio Monte Lago

	pH	Residuo fisso	Durezza	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ⁺ ₄	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Li ⁺	Sr ⁺⁺
24/11/06	7,68	294	28,62	111,12	2,02	<0,05	<0,01	10,01	6,22	2,31	12,56	24,39	328,0	0,24	0,02	0,07
02/02/07	7,82	255	24,40	92,00	3,36	0,26	0,032	4,96	7,13	0,47	13,70	4,92	280,0	0,34	0,02	0,07
02/04/07	8,04	216	19,72	75,20	2,20	0,2	ass.	5,22	3,17	0,17	6,39	5,70	233,0	0,17	0,02	0,06
11/06/07	7,83	273	26,20	97,12	4,60	ass.	ass.	4,91	3,63	0,29	11,50	3,60	288,0	0,15	0,02	0,07

Grotta Piccola di Caprelle

	pH	Residuo fisso	Durezza	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ⁺ ₄	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Li ⁺	Sr ⁺⁺
15/09/06	7,39	206	19,40	72,32	3,16	ass.	ass.	6,12	2,10	0,60	7,52	1,31	220,0	0,20	<0,02	0,10
24/11/06	7,48	191	17,80	68,84	1,39	<0,05	<0,01	5,54	2,69	0,89	11,14	2,46	180,0	0,21	<0,02	0,11
02/02/07	7,60	219	20,60	75,20	4,32			5,31	2,82	0,74	9,65	1,43	228,0	0,17	<0,02	0,11
02/04/07	7,50	229	21,98	83,50	2,73	ass.	ass.	5,22	2,91	0,44	7,38	0,75	250,0	0,22	<0,02	0,13
11/06/07	7,31	218	20,64	76,72	3,50	ass.	ass.	5,62	2,76	0,57	8,02	1,98	235,0	0,22	<0,02	0,12
28/06/07	7,37	196	19,40	68,72	2,22	ass.	ass.	5,80	2,78	0,57	8,30	0,67	200,0	0,21	<0,02	0,12
07/08/07	7,49	189	18,42	70,80	2,73	ass.	ass.	5,27	2,70	0,57	9,30	1,13	193,0	0,19	<0,02	0,11
12/09/07	7,35	194	18,36	70,40	1,82	ass.	ass.	5,09	2,71	0,47	7,59	0,69	209,5	0,23	<0,02	0,11

Sorgente Figareto

	pH	Residuo fisso	Durezza	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ⁺ ₄	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Li ⁺	Sr ⁺⁺
15/09/06	7,35	196	17,26	62,56	3,88	ass.	ass.	0,57	4,30	0,60	12,63	3,39	205,0	0,26	<0,02	0,11
02/04/07	7,59	218	19,94	76,00	2,25	ass.	ass.	1,01	3,82	1,07	14,27	2,98	230,0	0,26	<0,02	0,11
11/06/07	7,47	203	18,60	69,04	3,21	ass.	ass.	3,10	3,84	0,58	12,42	4,51	202,0	0,02	<0,02	0,05
28/06/07	7,23	217	20,24	75,50	3,36	ass.	ass.	0,53	3,94	0,37	11,36	4,04	230,0	0,28	<0,02	0,08
07/08/07	7,27	225	21,00	78,56	3,26	ass.	ass.	0,26	4,48	0,35	16,33	3,95	230,0	0,30	<0,02	0,10
12/09/07	7,31	207	19,46	73,60	2,54	ass.	ass.	1,59	3,95	0,41	11,22	2,71	223,5	0,31	<0,02	0,18

Grotta del Castoro

	pH	Residuo fisso	Durezza	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ⁺ ₄	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	F ⁻	Li ⁺	Sr ⁺⁺
15/09/06	7,37	224	20,76	73,28	5,85	ass.	ass.	2,92	4,30	0,81	10,43	11,03	230,0	0,34	<0,02	0,25
24/11/06	7,25	229	21,08	75,60	5,23	<0,05	<0,01	2,83	4,55	0,81	10,50	9,64	235,0	0,34	<0,02	0,24
02/02/07	7,50	231	21,10	79,00	3,36			2,79	4,40	0,80	11,57	8,10	240,0	0,41	<0,02	0,25
02/04/07	7,54	229	20,54	72,80	5,61	ass.	ass.	2,70	4,53	0,93	10,29	7,31	240,0	0,43	<0,02	0,25
11/06/07	7,02	249	20,60	77,36	3,02	ass.	ass.	2,64	4,28	0,79	11,69	11,06	270,0	0,42	<0,02	0,26
28/06/07	6,92	234	20,58	73,52	5,28	ass.	ass.	0,45	4,46	0,78	10,79	10,83	258,0	0,42	<0,02	0,25
07/08/07	7,30	222	20,40	74,00	4,56	ass.	ass.	2,87	4,29	0,80	11,92	9,94	222,0	0,44	<0,02	0,25
12/09/07	6,84	221	20,24	74,40	3,94	ass.	ass.	3,10	4,53	0,82	11,15	10,11	224,0	0,43	<0,02	0,26

Le variazioni stagionali di chimismo non raggiungono valori elevati e sono più significative nelle sorgenti minori, mentre nelle due emergenze maggiori (San Giovanni e Castoro) i parametri chimici sono più stabili. Il coefficiente di variazione della durezza, calcolato considerando il range delle variazioni e il loro valore medio, ha valori bassi sia per la Grotta del Castoro (1,4%) che per la Sorgente San Giovanni (4,2%), mentre è leggermente più elevato nelle sorgenti Figareto (6,2%) e Caprelle (6,8%). Valori inferiori a 5% sono ritenuti significativi di una circolazione idrica diffusa, in sistemi di fessure, mentre in un flusso interamente controllato da canali carsici i valori risultano più elevati, tra il 10 ed il 20% (Shuster & White, 1971). Le variazioni stagionali di chimismo confermano quindi le risultanze desunte dall'analisi delle variazioni di temperatura e conducibilità nelle diverse emergenze.

Nel periodo monitorato, la concentrazione di nitrati si è mantenuta bassa in tutte le sorgenti, mentre non sono stati rilevati nitriti ed ammoniaca, indicatori di potenziali contaminazioni organiche dalla superficie. Eventi di questo tipo si sono avuti in passato,

almeno nella Sorgente Figareto, dove sono probabilmente imputabili alla tipologia della captazione, all'interno di detriti superficiali in un impluvio.

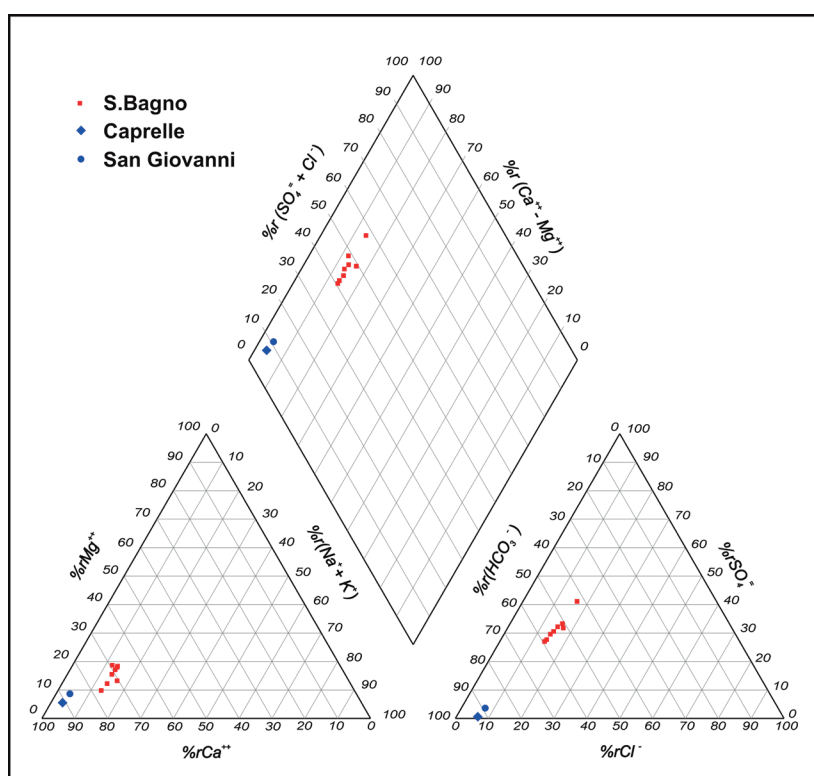
SORGENTE BAGNO

La Sorgente Bagno si differenzia dalle altre acque nell'area per il suo maggiore contenuto salino e per presenza di quantità significative di altri ioni, in particolare solfati. Tra tutte le acque analizzate è quella che ha manifestato le maggiori variazioni nella composizione chimica durante il periodo di osservazione, confermando l'esistenza di complesse modalità di drenaggio già evidenziate con l'analisi degli idrogrammi forniti dai logger a registrazione continua. Notevoli differenze nell'intero periodo di osservazione si hanno inoltre rispetto ai dati ottenuti in una successiva analisi effettuata il 3.6.2009.

Il residuo fisso è risultato variabile tra 333 e 417 mg/L. La concentrazione dei carbonati ha valori simili a quelli delle altre acque sorgive, mentre tutti gli altri ioni principali hanno concentrazioni più elevate. Il rapporto Ca/Mg è sensibilmente più basso, e sono presenti piccoli quantitativi di ioni stronzio e di acido solfidrico (H_2S). Da notare che le acque contengono anche ossigeno disciolto, di norma assente nelle acque sulfuree.

Seppure con diverse irregolarità, le concentrazioni dei diversi ioni hanno seguito un trend discendente nel periodo, registrando un temporaneo incremento nel periodo tardo primaverile, al termine della stagione piovosa. Questo incremento è stato particolarmente sensibile per gli ioni solfato e magnesio. Fa eccezione il calcio, il cui contenuto è rimasto più costante. Da osservare che, esclusi i bicarbonati, tutte le concentrazioni ioniche sono risultate molto più elevate nel controllo del giugno 2009, dopo il termine del periodo siccitoso in cui si sono svolte le misure.

Fig. 12



Le variazioni di chimismo osservate sono imputabili ad una alimentazione mista della sorgente, con acque risalenti dal basso arricchite in solfati e cloruri che si miscelano con acque che seguono circuiti più superficiali (Fig. 12). L'arricchimento in ioni magnesio, solfato e cloruri nelle acque della Sorgente Bagno è compatibile con l'esistenza di circuiti profondi che coinvolgono le sottostanti unità evaporitiche triassiche (Fig.8). Il contributo relativo delle due componenti è soggetto a variazioni complesse, legate alla dinamica dei circuiti idrici, che hanno determinato una riduzione degli apporti di acque mineralizzate dal basso durante il periodo di siccità.

Caratteri isotopici

Contestualmente alle analisi chimiche, sono stati analizzati i contenuti di isotopi stabili delle acque e di alcuni sali in esse disciolti (Tab.3). I valori sono espressi sotto forma di variazione rispetto alle percentuali standard $\delta = [(R_{\text{campione}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}] \cdot 10^3$, dove R rappresenta il rapporto $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, o $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) e consentono di avere informazioni sulla provenienza e sulla "storia" delle acque sotterranee. I valori di $\delta^2\text{H}$ e di $\delta^{18}\text{O}$ delle molecole di acqua sono stati determinati su campioni di tutte le acque, con un prelievo in primavera ed uno in autunno, nelle diverse condizioni idrologiche. Sono poi stati quantificati i valori $\delta^{13}\text{C}$ e di $\delta^{18}\text{O}$ dei carbonati e di $\delta^{34}\text{S}$ nei solfati. Il contenuto di solfati si è rivelato troppo basso per le acque emergenti dagli acquiferi minori sospesi; anche nelle acque emergenti dall'acquifero di base le quantità di solfati ottenute non sono sempre state sufficienti per le analisi, tranne che per la Sorgente Bagno, ad elevata mineralizzazione.

ISOTOPI ACQUE

I valori isotopici misurati in tutte le località sono ben compatibili con acque di derivazione meteorica. I valori di $\delta^2\text{H}$ risultano sistematicamente inferiori a quelli previsti tramite l'equazione di Craig. In tutte le località il $\delta^{18}\text{O}$ a fine estate (settembre) è risultato più negativo rispetto alla primavera (marzo). Poiché valori più negativi di $\delta^{18}\text{O}$ sono correlabili a temperature più basse delle acque di infiltrazione meteorica, le variazioni misurate sono interpretabili come conseguenza del ritardo che si verifica tra l'infiltrazione delle acque, che avviene principalmente nel periodo freddo, e la restituzione nelle emergenze. Questo effetto è meno pronunciato nelle sorgenti degli acquiferi di base ed in particolare nella Sorgente San Giovanni, poco soggetta a variazioni stagionali di ogni tipo. Per questa sorgente, in particolare, si può osservare che i valori isotopici sono molto vicini a quelli misurati nell'inghiottitoio di Monte Lago nel periodo invernale.

Per la correlazione tra altitudine e $\delta^{18}\text{O}$, un buon riferimento è rappresentato dalla Grotta Piccola di Caprelle (altitudine 795 m), il cui bacino di alimentazione si estende in una fascia altimetrica compresa tra 800 e 1000 m; nella sorgente i valori di $\delta^{18}\text{O}$ sono -9,06 e -8,65‰, rispettivamente in settembre e marzo. Valori simili (-9,07‰) sono stati ottenuti anche nelle acque dell'inghiottitoio di Monte Lago, con bacino di alimentazione esteso nella stessa fascia altimetrica.

Le acque delle altre sorgenti monitorate evidenziano valori leggermente più elevati, che sono compatibili con bacini di alimentazione estesi anche a quota inferiore. Fa eccezione la Sorgente San Giovanni, in cui i $\delta^{18}\text{O}$ sono più negativi (9,15 e 9,07‰), probabilmente per un maggior contributo di precipi-

tazioni invernali nell'alimentazione della sorgente.

CARBONATI

I valori di $\delta^{13}\text{C}$ nei carbonati sono influenzati dall'origine del carbonio stesso, in parte derivato dal carbonato di calcio che costituisce la roccia (dove $\delta^{13}\text{C} \sim 0\text{‰}$), in parte disciolto nelle acque di infiltrazione e proveniente dall'atmosfera o dal suolo ($\delta^{13}\text{C}$ negativo). Eventuali apporti di carbonio biogenico possono incrementare il contenuto di isotopi leggeri. Il valore del $\delta^{13}\text{C}$ dei carbonati disciolti dipende quindi dall'importanza dei diversi contributi, e si avvicina maggiormente a quello della roccia incassante quando il carbonato deriva in larga parte dalla dissoluzione del calcare.

Le variazioni stagionali misurate sono di piccola entità e non chiaramente correlabili a cicli stagionali. Nei campioni analizzati i valori del $\delta^{13}\text{C}$ nei carbonati oscillano tra valori compresi tra 7,5 e 11‰, con significative differenze. Valori più bassi si riscontrano e negli acquiferi minori, legati a circuiti superficiali. I valori più alti caratterizzano invece le sorgenti degli acquiferi maggiori ed il Fiume Potenza. La Sorgente Bagno, rispetto alle altre sorgenti alimentate dagli acquiferi di base, mostra una maggiore abbondanza di isotopi leggeri (media $\delta^{13}\text{C} = 9,79\text{‰}$).

I valori medi del $\delta^{18}\text{O}$ sono simili nelle diverse sorgenti e nel Fiume Potenza, e leggermente più alti nella Sorgente Bagno. Si discostano i valori della Grotta del Castoro, variabili e mediamente più negativi. Il campionamento di questa sorgente, come già evidenziato, è disturbato dal pompaggio delle acque per usi industriali. Il $\delta^{18}\text{O}$ nei carbonati varia seguendo cicli stagionali, con lieve innalzamento dei valori in occasione dei periodi piovosi di fine inverno e primavera ed è associato all'aumen-

to della concentrazione degli ioni bicarbonato e calcio nelle acque in occasione degli stessi eventi.

SOLFATI

Il $\delta^{34}\text{S}$ nei solfati della Sorgente Bagno si è mantenuto abbastanza stabile in tutto il periodo, (media: +15,7‰), ma si evidenzia un trend complessivamente discendente, correlabile al progressivo abbassamento dei valori di conducibilità. I dati relativi alle acque del Fiume Potenza, hanno un contenuto di solfati elevato rispetto alle normali acque fluviali, ed il $\delta^{34}\text{S}$ (media: +15,8‰) conferma la probabile contribuzione di acque solfatiche di provenienza profonda nell'alimentazione del fiume.

La concentrazione dei solfati nelle sorgenti San Giovanni e Grotta del Castoro è maggiore che negli acquiferi sospesi. L'arricchimento in solfati degli acquiferi di base è piuttosto comune nella regione marchigiana per la presenza delle evaporiti triassiche al letto della successione carbonatica. Nelle sorgenti San Giovanni e Grotta del Castoro i valori di $\delta^{34}\text{S}$ sono tuttavia relativamente bassi ($\delta^{34}\text{S}$ tra + 7 e +8‰), sia rispetto ai solfati della Sorgente Bagno e del Fiume Potenza, sia in confronto ad altri acquiferi carbonatici (Sorgente Gorgovivo: $\delta^{34}\text{S} \sim 14\text{‰}$, Sorgente Scirca $\delta^{34}\text{S} \sim 16\text{‰}$). Il basso valore misurato potrebbe essere correlato all'ossidazione di piccoli quantitativi di solfuri, risalenti dal basso come H_2S o presenti nel calcare come FeS_2 . Il valore negativo o molto negativo del $\delta^{34}\text{S}$ dei solfuri può infatti abbassare il valore complessivo del $\delta^{34}\text{S}$ nei solfati disciolti.

Fiume Potenza

	Solfuri $\delta^{34}\text{S}$	Solfati $\delta^{34}\text{S}$	Carbonati $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$		Acqua $\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	
15/09/2006		16,123	-7,891	-6,016	-8,96	-57,85
24/11/2006		15,45	-8,27	-4,90		
02/02/2007		15,708	-8,222	-4,715		
31/03/2007		15,333			-8,31	-53,89
11/05/2007			-8,21	-4,54		
28/06/2007		15,288	-8,12	-4,734		
07/08/2007			-8,245	-4,637		
12/09/2007			-8,168	-4,723		

Grotta Castoro

	Solfuri $\delta^{34}\text{S}$	Solfati $\delta^{34}\text{S}$	Carbonati $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$		Acqua $\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	
15/09/2006		7,869	-8,489	-6,771	-8,94	-51,67
24/11/2006		8,19	-7,72	-9,01		
02/02/2007						
31/03/2007		7,802	-8,12	-4,66	-8,72	-55,94
11/05/2007			-8,17	-7,75		
28/06/2007		7,806	-7,89	-9,386		
07/08/2007			-8,626	-5,594		
12/09/2007			-7,844	-8,317		

Sorgente Bagno (Fiuminata)

	Solfuri $\delta^{34}\text{S}$	Solfati $\delta^{34}\text{S}$	Carbonati $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$		Acqua $\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	
15/09/2006		16,158	-11,283	-8,957	-8,65	-53,52
24/11/2006	16,07	15,78	-9,48	-5,47		
02/02/2007		15,604	-9,797	-4,819		
31/03/2007		16,334	-9,39	-4,23	-8,31	-52,01
11/05/2007		15,610	-9,62	-5,12		
28/06/2007		15,509	-9,392	-5,079		
07/08/2007		15,377	-9,747	-4,846		
12/09/2007		15,114	-9,623	-5,129		

Sorgente San Giovanni

	Solfuri $\delta^{34}\text{S}$	Solfati $\delta^{34}\text{S}$	Carbonati $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$		Acqua $\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	
15/09/2006			-8,103	-4,73	-9,15	-57,33
24/11/2006		6,96	-8,12	-4,58		
02/02/2007			-8,291	-4,215		
31/03/2007			-8,27	-3,40	-9,07	-57,31
11/05/2007			-8,16	-4,01		
28/06/2007		6,911	-8,101	-4,304		
07/08/2007			-8,024	-3,967		
12/09/2007		6,867	-8,129	-4,202		

Grotta Piccola Caprelle

	Solfuri $\delta^{34}\text{S}$	Solfati $\delta^{34}\text{S}$	Carbonati $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$		Acqua $\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	
15/09/2006			-8,84	-6,302	-9,06	-56,16
24/11/2006			-10,31	-4,59		
02/02/2007			-10,135	-3,634		
31/03/2007			-10,39	-3,42	-8,65	-55,15
11/05/2007			-10,61	-4,56		
28/06/2007			-10,512	-4,134		
07/08/2007			-10,273	-3,865		
12/09/2007			-10,535	-4,579		

Sorgente Figareto

	Solfuri $\delta^{34}\text{S}$	Solfati $\delta^{34}\text{S}$	Carbonati $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$		Acqua $\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	
15/09/2006			-11,02	-5,15	-8,91	-55,11
24/11/2006						
02/02/2007						
31/03/2007			-10,66	-3,21	-8,48	-53,41
11/05/2007			-10,51	-3,98		
28/06/2007			-11,358	-4,724		
07/08/2007			-11,853	-5,247		
12/09/2007						

Monte Lago

	Solfuri $\delta^{34}\text{S}$	Solfati $\delta^{34}\text{S}$	Carbonati $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$		Acqua $\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$	
15/09/2006						
24/11/2006						
02/02/2007						
31/03/2007					-9,07	-58,39
11/05/2007						
28/06/2007						
07/08/2007						
12/09/2007						

La dorsale di Monte Lago: Grotte e Carsismo

Il carsismo superficiale

Nell'area di studio il paesaggio è di tipo fluviocarsico, ed i principali elementi morfologici sono le profonde valli che i fiumi incidono entro la dorsale montuosa. L'idrografia minore è meno sviluppata, anche se numerosi solchi vallivi incidono i fianchi delle valli maggiori. Uno scorrimento idrico permanente si ha solo nei fiumi di fondovalle, mentre sulle dorsali montuose il drenaggio superficiale è scarso o assente, per via della elevata permeabilità delle rocce, incrementata anche dall'azione solvente svolta dalle acque d'infiltrazione.

I Piani di Monte Lago sono la più importante manifestazione carsica, con punti di assorbimento concentrato negli inghiottitoi. Nel resto dell'area l'assorbimento delle acque avviene principalmente in forma dispersa senza che si sviluppino tuttavia tipiche forme carsiche di superficie. Le coperture detritiche sui versanti, la copertura vegetale e gli spessori, anche ridotti, di suolo riducono infatti gli affioramenti di roccia nuda; solo nelle aree più impervie, in particolare sul Calcare Massiccio sono talora presenti forme dovute alla corrosione carsica delle acque piovane. Tra di esse le forme più caratteristiche sono l'insieme di fori e alveolature che esaltano le disomogeneità della roccia, conferendo un aspetto irregolare, cariato, e lasciano in rilievo i materiali meno solubili. Sono invece rare forme più tipiche come scanellature e vaschette. Vere doline sono molto rare, e segnalate solo nel Monte Castel Santa Maria (Galdenzi

et al., 2012), mentre alcune doline di soffusione si formano nella piana detritica di Monte Lago, per effetto di processi di trasporto verso il basso dei sedimenti ad opera delle acque di infiltrazione.

Il carsismo profondo

Rispetto alle forme carsiche di superficie, le grotte sono più comuni e documentano l'importanza della circolazione idrica sotterranea. Nel territorio esaminato sono conosciute circa cinquanta grotte, in maggioranza già descritte in bibliografia (Galdenzi *et al.*, 2008a, 2008b, 2009, 2012). Le grotte sono in larga parte di origine carsica, e appartengono a differenti tipologie morfologiche, alcune delle quali ben conosciute in ambito regionale (Galdenzi, 1988, 1996, 2004; Bambini & Galdenzi, 1997); nonostante nessuna grotta raggiunga uno sviluppo elevato, l'ampia varietà dei fenomeni consente un'articolata discussione sullo sviluppo e sulle caratteristiche del carsismo profondo.

Piccoli sistemi verticali sono abbastanza comuni, in genere alla sommità delle strutture montuose o ai loro margini. Sui fianchi ed ai piedi delle dorsali montuose si trovano grotte suborizzontali, di diversa struttura morfologica, con funzione di sorgente, attiva o fossile, sia presso il livello di base locale che a quote più elevate.

Altre cavità minori all'interno delle valli si sono originate per processi

differenti; alcune di esse derivano da processi di alterazione superficiale e talvolta non possono essere neppure considerate di origine carsica. Caratteristiche peculiari presentano le Grotte di Marmuschio e le grotte di Piano della Porta, sviluppate su corpi mineralizzati all'interno del Calcarea Massiccio, ed anche le grotte nei depositi di travertino presenti all'interno delle valli principali. Un caso unico è rappresentato dal sistema delle due grotte di Caprelle (Galdenzi, 1983, 2013), formato da una parte superiore verticale che interseca un insieme di gallerie sub-orizzontali disposte a diverse altezze.

Nei paragrafi seguenti le caratteristiche delle principali fenomeni carsici nell'area saranno descritte in dettaglio, analizzando con maggior dettaglio i casi di studio sui quali si sono concentrate le ricerche svolte.

I Piani di Monte Lago

I Piani di Monte Lago sono la più importante manifestazione carsica superficiale nell'intera zona, e si sviluppano al centro della dorsale

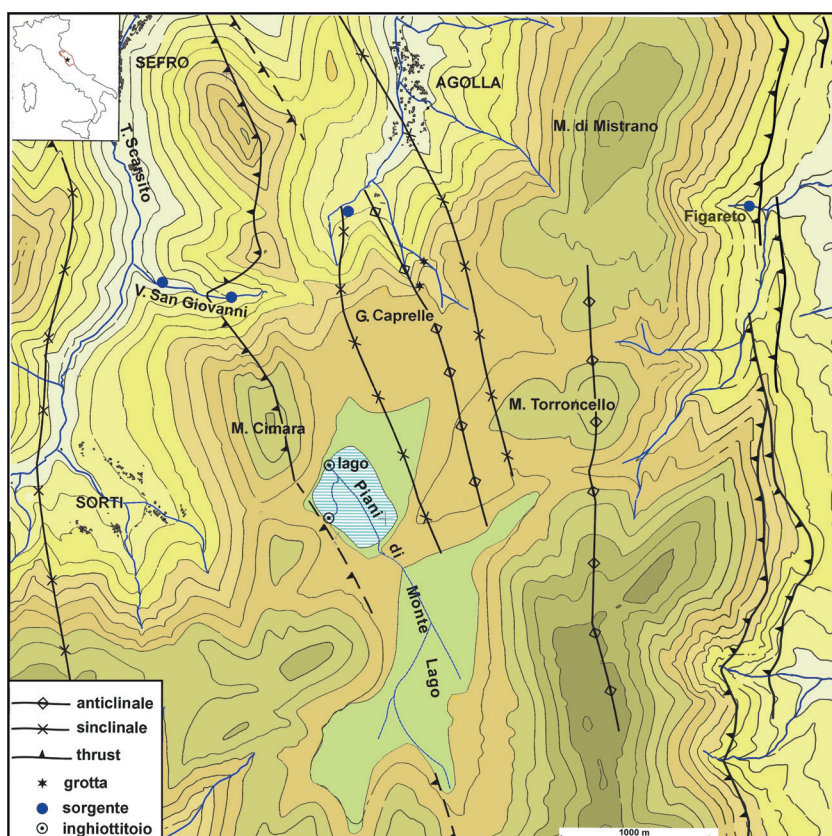
montuosa, in una depressione morfologica impostata su di una depressione di origine tettonica. Dal punto di vista geologico, i Piani si trovano nell'unità sovrascorsa di Monte Primo - Monte Cavallo, in un'ampia struttura sinforme, comprendente due sinclinali principali ed un'anticlinale interposta, che coinvolgono i terreni dalla Maiolica alla Scaglia Rossa. Verso ovest la struttura è in contatto tettonico con l'anticlinale più esterna di Monte Cimara (Fig.13).

L'evoluzione dei Piani è iniziata in un passato contesto morfologico, contestualmente al modellamento delle superfici di erosione nel Pliocene e nel Pleistocene inferiore. Il successivo approfondimento dell'idrografia superficiale ha determinato la formazione di profonde valli fluviali, le cui acclivi testate arrivano ad incidere le aree marginali dei Piani stessi, in particolare presso il bordo settentrionale.

Nel dettaglio si distinguono due piani chiusi, separati da un costone di roccia impostato nella Scaglia Bianca. Il piano superiore, con quota minima di 918,2 m s.l.m., si estende per circa 1,1 Km² ed è interamente coltivato, grazie ad un sistema di drenaggi che previene il ristagno d'acqua nei periodi piovosi. Il piano inferiore, con quota minima di 891,0 m s.l.m., ha un'area di circa 0,6 Km², ed è parzialmente occupato da un'area palustre. Nel piano inferiore confluiscono attualmente anche le acque da quello superiore a seguito del taglio del costone divisorio ordinato da Giulio Cesare da Varano nel 1458 (Falaschi, 1987), ed in esso si trovano gli inghiottitoi attualmente attivi.

Il deflusso delle acque che si raccoglie nei piani avviene esclusivamente per via sotterranea in regime carsico e solo a seguito di intensi periodi piovosi e/o scioglimento delle nevi si ha la formazione di un lago, con spessore d'acqua fino a 2,5 m.

Fig. 13



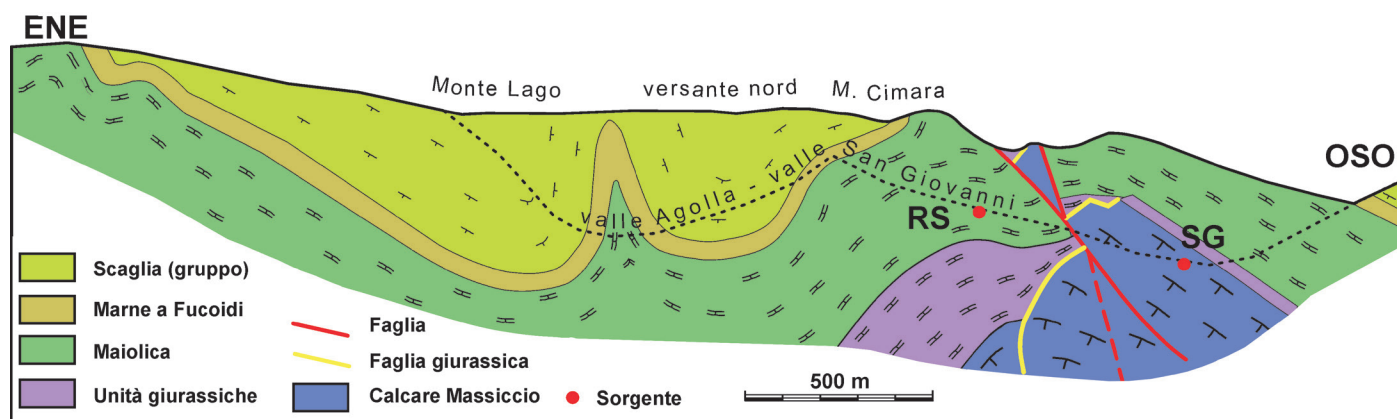


Fig. 14

L'acqua è drenata da inghiottitoi impostati sulla Maiolica, disposta con strati verticali, attraverso cui defluisce in vie drenanti di piccole dimensioni. L'abbondante quantità di detrito fine tende ad ostruire gli accessi delle vie drenanti, che restano inesplorate nonostante gli scavi operati in passato per favorire la bonifica dell'area ed i tentativi di disostruzione operati dagli speleologi.

La giacitura delle unità geologiche, le osservazioni idrologiche, e le risultanze di esperienze con coloranti eseguite in passato (Dramis & Deiana, comunicazione personale) indicano che il principale punto di risorgenza si trova nella Valle San Giovanni, ubicata circa 1,5 km a nord ovest, 300 m più in basso, seppure risposte positive furono ottenute anche in altre località. Anche le recenti prove con traccianti eseguite da Acquilanti *et al.* (2013) confermano che la principale emergenza è ubicata in Valle San Giovanni, senza tuttavia fornire indicazioni di dettaglio sui punti di emergenza. Nessuna delle grotte conosciute nell'area mostra chiare evidenze di una relazione genetica diretta con l'inghiottitoio di Monte Lago, e non sono neppure conosciute grotte carsiche nella Valle San Giovanni.

Il monitoraggio idrologico ha evidenziato un differente comportamento delle sorgenti presenti nella valle, dovuto alla struttura geologica ed alle modalità di drenaggio. La

Sorgente San Giovanni al nucleo della struttura anticlinale è captata per uso idropotabile; i suoi stabili parametri idrochimici sono compatibili con un'alimentazione assicurata in prevalenza dall'acquifero di base, esteso principalmente nel Calcare Massiccio, che costituisce il nucleo della struttura anticlinale (Fig.14). La portata della sorgente, molto elevata se confrontata con l'estensione areale degli affioramenti di Calcare Massiccio, indica che alla sua alimentazione contribuiscono anche acque assorbite in altre unità stratigrafiche, in connessione idrologica nonostante le barriere di permeabilità interposte all'interno della successione.

Le sorgenti temporanee nella parte alta della valle si trovano invece su Maiolica, la stessa unità idrogeologica in cui si aprono gli inghiottitoi, e rappresentano risorgenti di troppo pieno attive nei periodi di apporti più elevati, con caratteri idrologici estremamente variabili. La possibilità di drenaggi estremamente rapidi evidenzia l'alto grado di carsificazione raggiunto in questa parte del massiccio calcareo, dove in occasione dei periodi di alta portata si attiva una rete di canali carsici.

Il diverso comportamento delle sorgenti può essere giustificato dalle condizioni giaciturali nell'area. La Maiolica in affioramento è in contatto tettonico con il Calcare Massiccio su faglia inversa nel fianco orientale

della piega, ma si può ritenere che in profondità le due unità siano separate dalle unità poco permeabili del Giurassico medio e superiore, poggianti in *onlap* su una paleoscarpata di faglia che borda il paleorilievo giurassico di Monte Cimara verso est (Fig.14). Questi rapporti giacitureali riducono la possibilità di apporti rapidi di acque assorbite a Monte Lago verso la falda di base, per cui nella Sorgente San Giovanni non si registrano importanti variazioni nei parametri fisico-chimici dovute al diretto arrivo di acque dagli inghiottitoi.

Le grotte di Caprelle

MORFOLOGIA

Il sistema delle grotte di Caprelle è sicuramente il complesso più articolato dell'area (Galdenzi, 1983, 2013). Due grotte di struttura molto differente si aprono a breve distanza l'una dall'altra, tra gli 800 ed i 900 m di altitudine, in una zona scoscesa alla testata della valle di Agolla, presso il margine settentrionale dei Piani

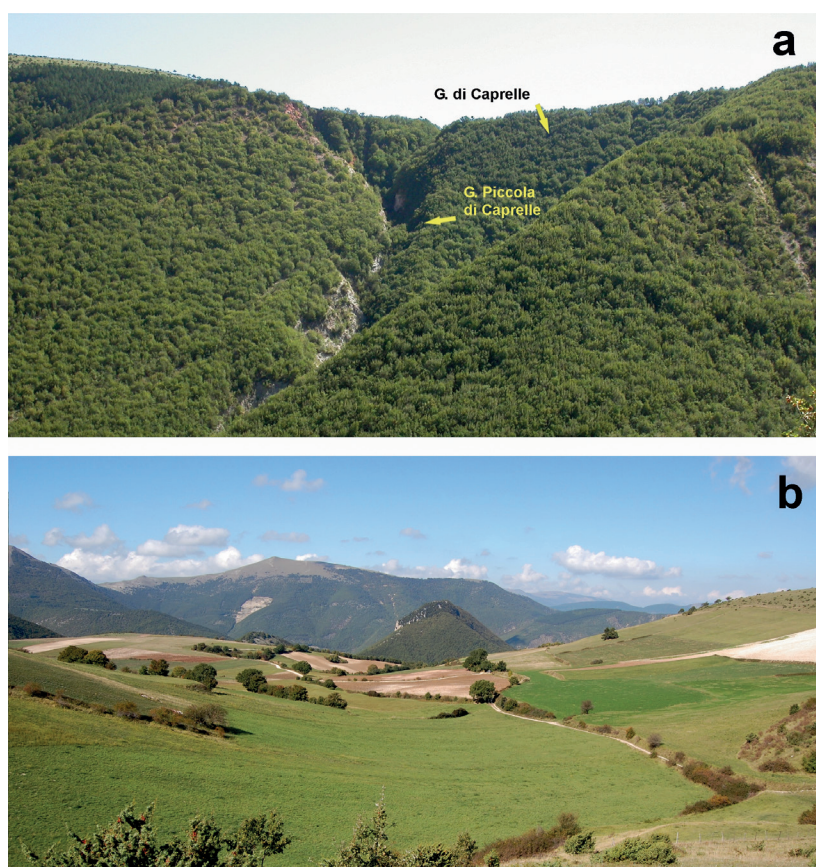
di Monte Lago (Fig.15). Il loro profilo altimetrico è stato verificato tramite livello elettronico, e su questa base sono state ridisegnate le sezioni (Galdenzi, 2013). Le due grotte arrivano ad essere molto vicine nella parte terminale, ma non esistono connessioni praticabili.

L'assetto morfologico è strettamente controllato dalle condizioni tettonico-stratigrafiche (Galdenzi, 1983). Le grotte si sviluppano entro un piccolo spessore di strati della Scaglia Bianca nel fianco orientale, sub-verticale, della piccola anticlinale situata al centro della struttura sinforme in cui si trovano anche i Piani di Monte Lago (Fig.16). La Grotta Piccola segue in tutto il suo sviluppo l'asse di una mesopiega di tipo anticlinale. In entrambe le grotte sono attivi i processi di clastesi, favoriti anche dall'intensa fratturazione dell'ammasso roccioso, ed il pavimento è quasi ovunque formato dai detriti distaccati dalle volte.

La Grotta Piccola di Caprelle si trova a 795 m s.l.m. nella zona più stretta del profondo solco vallivo alla testata della valle di Agolla, ~10 m sopra una piccola sorgente perenne. È costituita da un'unica galleria di andamento sub-orizzontale (larghezza ~2 m, altezza 1-2 m), che si sviluppa per circa 100 m con un dislivello positivo di 10 m. Solo a tratti si sono conservate preesistenti morfologie di tipo corrosivo e sottili rivestimenti concrezionari.

La Grotta di Caprelle si apre a 880 m s.l.m., si sviluppa per ~250 m e raggiunge la profondità di ~75 m. Nonostante il breve sviluppo ha una struttura complessa, derivante dalla combinazione e sovrapposizione di gallerie originate per processi differenti. L'ingresso è un pozzo (P14), tagliato per arretramento del versante al margine del sovrastante Piano, che si congiunge ad un pozzo parallelo nella prima sala. La grotta

Fig. 15



prosegue verso il basso in un altro pozzo (P17), per raggiungere tramite un salto (P10) la sommità di un largo ambiente, dove cambia struttura e assume un prevalente andamento sub-orizzontale, con gallerie disposte su più livelli. I condotti sub-orizzontali non hanno un'attiva funzione idrologica, e sono intersecati da gallerie inclinate e pozzi. Gallerie inclinate interessate da scorrimento idrico stagionale sono invece presenti sia nella parte superiore che nelle zone profonde della grotta.

Le due grotte differiscono nettamente anche per il regime idrologico. Nella Grotta di Caprelle il flusso idrico varia stagionalmente. Nei periodi secchi, un moderato stillicidio produce depositi calcitici, spesso sotto forma di vaschette nelle gallerie inclinate. Nei periodi piovosi e durante lo scioglimento delle nevi una lamina d'acqua fluisce in larga parte delle pareti, originando rivoli che attraversano le maggiori sale producendo localmente attive forme di corrosione. La Grotta Piccola di Caprelle, al contrario, è sostanzialmente priva di stillicidio, ma è percorsa da un ruscello permanente che alimenta la vicina sorgente. Lo scorrimento idrico avviene principalmente tra i detriti del pavimento, e solo in due zone l'acqua fluisce liberamente nella galleria. Il deflusso si mantiene abbastanza regolare, con portate che non superano i pochissimi L/s. I risultati del monitoraggio idrologico effettuato nella grotta sono discussi in altra sezione.

RIEMPIMENTI

Oltre alla grande quantità di materiale clastico, nelle due grotte si trovano anche altri depositi sia di tipo fisico che chimico, in maggior quantità nella G. di Caprelle, dove i processi di deposizione sono ancora attivi. I depositi calcitici sono più comuni nella G. di Caprelle, dove localmente raggiungono volumi signifi-

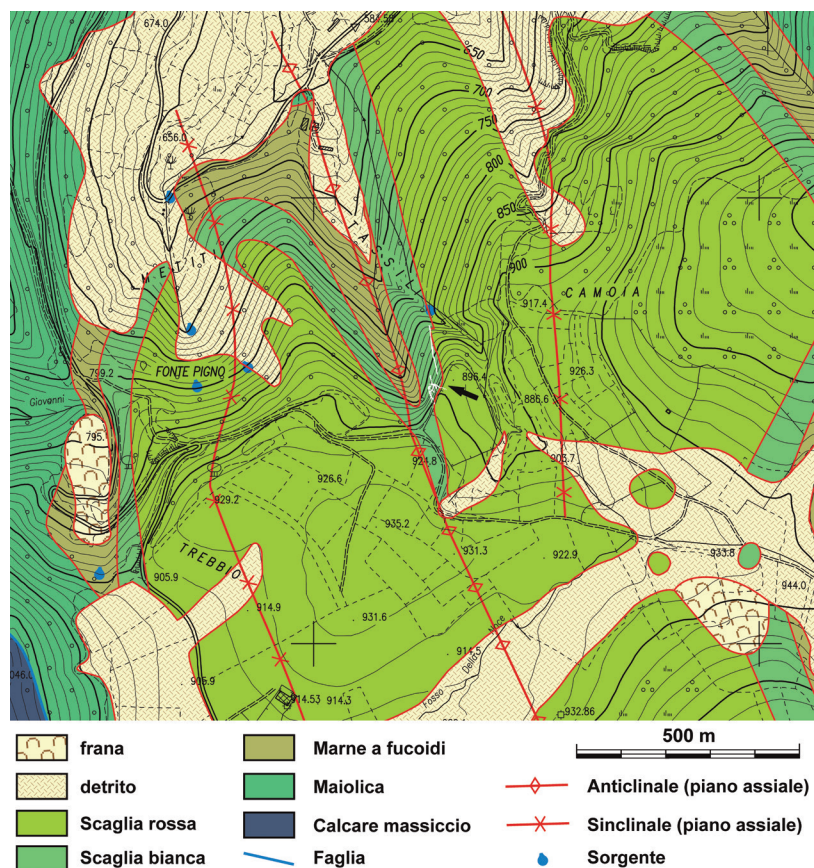


Fig. 16

ficativi. L'attività incrostante delle acque sulle pareti può coesistere con lo scivolamento di un sottile spessore di fanghiglia. Oltre a queste concrezioni attive, ci sono residui di croste calcitiche più antiche, spesso associate a sottili rivestimenti di fanghiglie nere ricche di ossidi di Fe e Mn, localmente ben conservate nella Grotta Piccola.

Nella G. di Caprelle sono comuni anche depositi detritici prevalentemente fangosi, contenenti livelli sabbiosi derivati dalla frammentazione dei letti di selce contenuti nel substrato calcareo. Questi materiali detritici derivano dal trasporto ad opera di acque vadoze e dal colamento di fanghiglie sulle pareti. Il processo è tuttora attivo e direttamente osservabile, ma la maggior parte dei materiali deriva da precedenti eventi deposizionali, e si è conservata in zone protette dai flussi attuali o addirittura in tasche parietali o sulle volte.

Le datazioni radiometriche effettuate con il metodo U/Th hanno eviden-

ziato una deposizione di concrezioni carbonatiche che si è protratta per l'intero Pleistocene superiore, con età distribuite tra il sub-attuale e $92,5 \pm 3,4$ ka, nel campione più antico reperito nella G. Piccola di Caprelle (Voltaggio, 2010). Queste datazioni riguardano materiali raccolti in superficie, quando cioè le grotte avevano già raggiunto un assetto morfologico simile a quello attuale.

Particolarmente interessante una sequenza deposizionale della G. Piccola di Caprelle, in uno dei pochi tratti in cui sono conservate morfologie e depositi antecedenti alla attuale fase di produzione clastica (Galdenzi, 2013). In questo tratto le pareti sono pulite, levigate, con strutture di erosione comprendenti nicchie e fori che si sviluppano sul soffitto. La parete calcarea è rivestita in maniera discontinua da una sottile lamina di fanghiglie nere asciutte, ricche di idrossidi di Fe e Mn, e da una sovrastante crosta calcitica con piccole stalattiti, prodotta da acque percolanti.

Nella parte bassa della stessa parete ci sono piccoli depositi di ghiaie intra-formazionali, debolmente arrotondate, con abbondante matrice fangosa; gli elementi ghiaiosi sono spesso rivestiti da fanghiglie scure, come le vicine pareti. Questi depositi sono stati deposti dal torrente ipogeo in piccole tasche o mensole e si trovano sia in appoggio sulla lamina calcitica, sia incrostatati al di sotto di essa. Essi documentano che l'attività deposizionale del corso d'acqua ipogeo coesisteva con l'azione incrostante delle acque percolanti, potendo prevalere l'una o l'altra in risposta a piccoli cambiamenti delle condizioni idrologiche.

Datazioni con la serie dell'uranio hanno fornito età di $37,6 \pm 0,6$ ka e $28,4 \pm 1,2$ ka (Voltaggio, 2010) rispettivamente per le fanghiglie nere e la sovrastante crosta calcitica, valori

coerenti con la disposizione stratigrafica, e consentono di riferire questi eventi deposizionali alle fasi fredde del Pleistocene superiore.

SPELEOGENESI

La coesistenza e la sovrimposizione di differenti morfologie documentano una storia evolutiva lunga ed articolata. L'assetto strutturale, ed in particolare la giacitura degli strati sul fianco della piega, ha condizionato il drenaggio idrico durante le varie fasi di sviluppo della grotta. Le direzioni disperse dei condotti sub-verticali ed inclinati dimostrano che nella zona vadosa il flusso delle acque verso il basso, pur se fortemente influenzato dalla disposizione degli strati, ha seguito anche discontinuità di origine tettonica (Galdenzi, 1983). Più in basso, la disposizione delle Marne a Fucoidi sul fianco verticale della piega è risultata determinante per i flussi orizzontali, favorendo direzioni di drenaggio parallele all'asse della piega ed agli strati calcarei, lungo cui si sono sviluppate le gallerie orizzontali (Galdenzi, 1983).

Le due grotte fanno parte di uno stesso sistema drenante e sono molto vicine, anche se non sono in diretta comunicazione. Gli ambienti orizzontali presenti nelle due grotte non rappresentano comunque la diretta prosecuzione della parte verticale della grotta, che si immette in gallerie provenienti da zone più interne della montagna. La G. di Caprelle rappresenta pertanto un tributario marginale di un più vasto sistema drenante sotterraneo esteso in senso orizzontale, di cui la G. Piccola è la terminazione più esterna.

L'alimentazione della falda idrica è compatibile con un assorbimento diffuso sulle superfici montuose retrostanti, dove al nucleo della sinclinale affiorano Scaglia Bianca e Scaglia Rossa (Fig.16), altamente permeabili per carsismo. L'analisi de-

gli idrogrammi e l'assetto geologico fanno invece escludere che la grotta sia in diretta connessione idrologica con l'inghiottitoio di Monte Lago, impostato in Maiolica sul fianco di una differente sinclinale.

I condotti sub-orizzontali distribuiti a diverse altezze suggeriscono che il livello di scorrimento delle acque abbia subito successivi abbassamenti, ma esso resta comunque sospeso 200 m al di sopra del vicino fondovalle, senza che esistano barriere di permeabilità dovute a variazioni litologiche che giustificano l'attuale quota di scorrimento.

Si può ritenere che lo sviluppo della grotta sia iniziato quando il livello locale di base locale si trovava a quote più elevate, prima del deciso approfondimento dell'idrografia avvenuto a partire dalla fine del Pleistocene inferiore. L'attuale quota di scorrimento delle acque potrebbe perciò essersi mantenuta in conseguenza di una minore permeabilità della parte inferiore dell'ammasso roccioso, meno carsificato.

Le grotte verticali

All'interno dell'area le grotte sub-verticali sono relativamente comuni: si tratta di piccole grotte formate da uno o pochi pozzi in rapidissima successione, con profondità massima di ~75 m raggiunta nella Grotta di Caprelle. Le grotte si aprono principalmente su Maiolica, ma possono trovarsi anche in altre formazioni rocciose, come Corniola (Grotta della Venarella) e Scaglia (Grotta di Caprelle).

Molte grotte hanno comunicazioni fortuite con l'esterno dovute all'abbassamento della superficie topografica che ne ha tagliato l'ingresso. Sono conosciute grotte che si trovano in stadi di evoluzione molto differenti: da grotte anguste, in fase di accrescimento, a grotte comple-

tamente fossili. L'attività idrica è generalmente discontinua e soggetta a forti variazioni stagionali, secondo l'andamento meteorologico.

LA CALLARELLA

Si trova a quota 815 m sul versante settentrionale di Monte Bordaino, nel versante idrografico destro della Valle del Potenza. Una piccola apertura nel terreno, dal diametro non superiore ad 1 m, immette in due pozzi abbastanza ampi, disposti in rapida successione, che raggiungono una profondità totale di ~20 m. La grotta si sviluppa nei calcari selciferi della Maiolica ed è interamente impostata su di una frattura; sulle pareti sono ben evidenti le stratificazioni della roccia calcarea, disposte sub-orizzontalmente e messe in rilievo da fenomeni di corrosione selettiva. Differenze morfologiche tra i due pozzi sono dovute alla diversa distanza dalla superficie. Nel primo pozzo cadono pietrame, terriccio e detriti organici dall'ingresso, mentre l'ambiente sottostante ha morfologie più belle e meglio conservate, con caratteristiche formazioni concrezionari e scannellature da corrosione sulle opposte pareti.

POZZO DI FONTE FRAGOLA

La grotta, profonda quasi 30 m, si apre a quota 860 m presso il margine occidentale della piana superficie di Monte Bordaino e si sviluppa all'interno della Maiolica su di un'evidente faglia che ha condizionato sia il modellamento del versante che lo sviluppo della grotta. Vi si accede tramite una piccola depressione quasi coperta da arbusti, che tramite un ripido cunicolo e un breve salto immette in un primo ambiente, con pareti rivestite da una crosta calcitica ricorrosa dalle acque di infiltrazione. La grotta prosegue in un pozzo maestoso e verticale, dalla sezione ellittica con assi di 3 ed 8 m, per una profondità totale di 15 m. Sulla volta

del pozzo, fino a oltre metà discesa, pendono abbondanti fasci di radici di alberi che scendono fino a oltre 10 m dalla superficie del suolo. Nonostante la vicinanza con l'esterno l'abbondante concrezionamento conferisce al pozzo caratteri tipici delle zone più interne di un massiccio carsificato.

Frammenti delle croste calcitiche parietali della prima sala sono stati datati con la tecnica dell'U-Th dalla Dott.ssa Paola Tuccimei a circa 33.000 anni fa (Galdenzi, 1996). Lo sviluppo della grotta è ovviamente antecedente alla deposizione della calcite, che ha rivestito le pareti quando la grotta aveva già raggiunto l'attuale conformazione.

ALTRE GROTTA

Altre piccole grotte di andamento verticale sono comuni nell'area, tutte sviluppate nella Maiolica, tranne la Grotta della Venarella. Il Pozzo di Pian dei Morri (o Grotta di Fonte del Gallo), si apre sulla sommità della dorsale montuosa, a 1135 m di altitudine, in una zona sub-pianeggiante a morfologia articolata. La grotta si sviluppa su una piccola frattura quasi verticale, negli strati calcarei sub-orizzontali. Nella grotta prevalgono processi di alterazione, che hanno mascherato le originarie morfologie. Le pareti sono soggette ad una diffusa azione corrosiva dovuta alle acque di infiltrazione e in generale prevalgono i fenomeni di clastesi.

La Buca di Sasso Freddo e la Grotta Bocalume sono due strette grotte di andamento verticale, ubicate ai margini meridionali del Piano inferiore di Monte Lago, a ~950 m di altitudine. Si aprono in un costone in rilievo morfologico all'interno degli strati verticali della Maiolica. La grotta maggiore, la Buca di Sasso Freddo, raggiunge una profondità di ~45 m, e si sviluppa in una frattura verticale, orientata ENE-OSO e disposta tra-

sversalmente rispetto alla giacitura degli strati. Vi è una debole percolazione idrica, dovuta ad acque di infiltrazione superficiale. L'angusto pozzo iniziale, profondo 8 m, è stato interamente svuotato dai detriti che lo ostruivano grazie agli scavi del Gruppo Autonomo Speleologico Portocivitanova.

La Buca della Vecchia è una grotta completamente fossile, aperta a 810 m di altitudine, all'interno della valle del Torrente Scarzito. Si trova in una zona scoscesa, poco sotto un ripiano di erosione, ed i suoi ingressi attuali sono dovuti all'arretramento del versante, fino a che l'asportazione di due strati di roccia ha "scoperchiato" il pozzo. La Buca è costituita da un unico pozzo con due accessi, sviluppato lungo gli strati verticali. La formazione del pozzo va ragionevolmente riferita al flusso di acqua d'infiltrazione raccolta in un differente contesto morfologico; l'attuale posizione impedisce ogni significativo apporto di acqua, se non quella di diretta precipitazione meteorica.

Grotte orizzontali

Grotte sub-orizzontali di dimensioni significative sono conosciute in varie località; in prevalenza si tratta di brevi cunicoli o caverne originate dal flusso di acque in direzione sub-orizzontale, verso le emergenze. Alcune di esse sono totalmente fossili, altre risultano tuttora attive. Grotte di questa tipologia si trovano sia presso il fondovalle che a quote più elevate sui versanti montuosi, all'interno di tutte le diverse formazioni calcaree, dal Calcare Massiccio alla Scaglia.

GROTTE DI SASSO FORCA

Le grotte di Sasso Forca sono un insieme di cunicoli entro la Scaglia Rossa alla base di una piccola parete rocciosa, nei ripidi versanti della valle del Torrente Scarzito. Il calcare

è molto carsificato, con un insieme di piccole gallerie e fori, non accessibili, ed alcuni cunicoli di maggiore sviluppo. Le grotte di dimensioni maggiori sono fossili, ma attività idrica può aversi in alcuni fori, non praticabili, in occasione di intense precipitazioni. Queste grotte si aprono ben al di sopra del locale livello di base; alle loro spalle, un esteso pianoro sviluppato nella Scaglia rappresenta una possibile zona d'infiltrazione. La breve estensione riduce le possibilità di osservazioni morfologiche di dettaglio. In base al contesto geomorfologico, si può ritenere che le grotte si siano originate per il flusso di acque assorbite dal sovrastante pianoro prima dell'arretramento del versante all'attuale posizione.

GROTTA DELLA BOTTE

Questa breve grotta è una interessante emergenza idrica attiva nel versante settentrionale della dorsale montuosa culminante con il Monte Bordaino, a 650 m di altitudine, all'interno di una valletta che scende verso il Fiume Potenza. La grotta è formata da un singolo cunicolo molto stretto, sub-orizzontale, impraticabile se non per individui di conformazione fisica molto minuta, ed è stata esplorata per ~70 m, senza raggiungerne la terminazione. La grotta si apre nella Maiolica e durante la stagione piovosa è percorsa da un rivolo d'acqua che defluisce dall'imbocco della grotta, originando un piccolo deposito di travertino in fase di accrescimento.

LE GROTTA DI FIGARETO

Due piccole grotte si aprono all'interno di un'incisione valliva nello scosceso versante orientale della dorsale di M. Primo - M. Igno, poco più in basso dell'omonima sorgente monitorata. Alcuni corpi di Scaglia s.l. delimitati da faglie inverse sono compresi all'interno di unità marnose, in prossimità del fronte di

sovrascorrimento che borda verso est la dorsale calcarea rispetto alle unità silicoclastiche e marnose della Sinclinale di Camerino. Le variazioni di permeabilità favoriscono la formazione di sorgenti per soglia di permeabilità, mentre all'interno dei corpi calcarei si sviluppano le grotte, che hanno la tipica struttura delle grotte-emergenza presenti sui fianchi delle anticlinali, con andamento parallelo alla direzione assiale della piega, profilo sub-orizzontale e tratti in contropendenza. Le due grotte hanno uno sviluppo totale di poche decine di metri e sono associate ad un fronte sorgentizio. Una di esse (la G. di Figareto II) è una piccola sorgente attiva, mentre la Grotta di Figareto, leggermente più estesa, è costituita da un cunicolo asciutto che risale verso l'esterno.

GROTTA MINORI

Altre grotte di breve sviluppo, si aprono all'interno delle vallate, con funzione di emergenze attive, come la Grotta di "Tonio" a Valle Scurosa, o la breve Risorgente di Madonna dei Calcinai, nel fondovalle presso Sefro. In quest'ultima località si apre un po' più in alto anche la Grotta della Pelucca, una vecchia emergenza delle stesse acque sorgive, abbandonata in seguito all'abbassamento del livello locale di base.

Diversa struttura ha la Grotta della Galleria (o di It), resa accessibile grazie a lunghi lavori di disostruzione operati dal Gruppo Speleologico AL.VA.P entro la galleria stradale a Pioraco, seguendo la corrente d'aria che spirava da una stretta fessura; la grotta è un stretto cunicolo inclinato lungo 70 m, sviluppato in una frattura carsificata nel Calcare Massiccio.

Altre brevi grotte si presentano come singole caverne, con comunicazione verso l'esterno di varia ampiezza, o come brevi cavità di andamento articolato presso la superficie

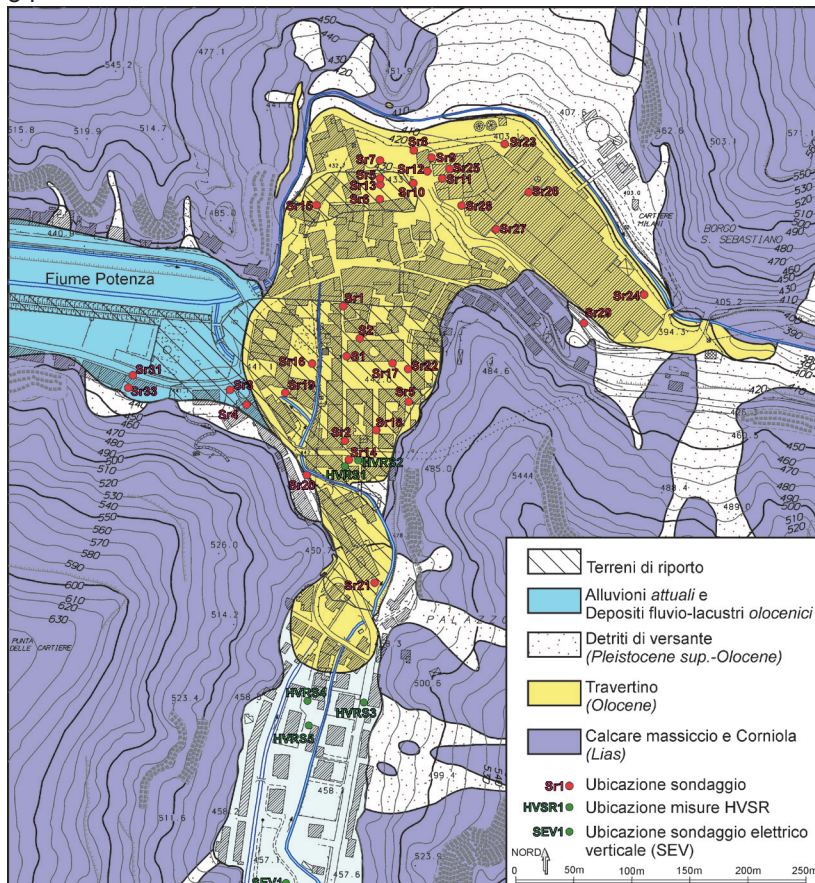


Fig. 17

topografica. In queste situazioni generalmente non è possibile definire con certezza le modalità di sviluppo; queste grotte talvolta sono la parte esterna di un condotto carsico inattivo, degradato o modificato dagli agenti esogeni, che precludono l'accesso a regioni più interne; in altri casi la grotta può essere il prodotto di processi di degradazione, erosione o dissoluzione che hanno agito sugli affioramenti rocciosi, in regioni di minor resistenza. In tal caso, è poco probabile che la grotta abbia ulteriori prosecuzioni, ed andrebbe considerata più propriamente tra le forme carsiche superficiali o addirittura tra le forme pseudocarsiche, se non derivante da processi di dissoluzione chimica.

I travertini

Nella dorsale montuosa oltre ai calcari della successione sedimentaria marina si trovano rocce calcaree di origine completamente diversa: i travertini. La deposizione di queste rocce è avvenuta in ambiente con-

tinente per l'azione incrostante delle acque in seguito al rilascio di anidride carbonica, con un processo simile a quello che nelle grotte determina il concrezionamento.

Il carbonato riveste tutti i materiali superficiali, compresi frammenti di materiali vegetali ed organismi viventi, come muschi, alghe, piante acquatiche. Il materiale organico con il tempo si decompone, lasciando una porosità interna che può essere molto elevata e che viene in parte ridotta dalla successiva deposizione chimica di ulteriori quantitativi di carbonati. Rispetto ai calcari marini, i travertini sono rocce meno compatte, più porose, e possono risultare teneri, friabili, soprattutto se di formazione recente.

Nella dorsale montana piccoli depositi di travertino si trovano nelle maggiori valli, in genere nella parte bassa dei versanti, spesso associati ad emergenze idriche attuali o antiche. La loro origine è relativamente recente, successiva alla formazione delle valli stesse. Il maggior deposito di travertino dell'area è quello di Pioraco, su cui poggia lo stesso abitato (Fig.17). Questo banco è costituito in prevalenza da materiali poco compatti e raggiunge grandi dimensioni, con un'area di circa 75000 m² ed uno spessore fino a 50-60 metri (Galdenzi *et al.*, 2012). Questo grande corpo ha una geometria a ventaglio e prograda dalla valle del Torrente Scarzito verso il Fiume Potenza, dove ostruisce la valle creando il gradino morfologico nell'alveo. L'accrescimento del corpo di travertino si è protratto fino all'Olocene, ed ha causato a monte di Pioraco la formazione di bacini lacustri sopravvissuti fino a tempi storici e colmati dai depositi fluvio-lacustri dell'attuale piana alluvionale di fondovalle.

Il travertino può contenere cavità singenetiche, originate cioè contestualmente al deposito stesso, che

in genere sono poi parzialmente riempite da detriti o concrezioni. Cavità di simile origine sono visibili sulle pareti della Gola dei Vurgacci, incisa dal Fiume Potenza al margine settentrionale del deposito di travertino. Grotte di origine carsica, prodotte cioè da successivi processi di dissoluzione chimica, sono comunque conosciute sia all'interno del corpo di travertino di Pioraco, che in altre località nell'area di studio ed ai suoi margini (Galdenzi *et al.*, 2009, 2012).

GROTTA DI SAN SOMMEO

Si tratta di un'ampia caverna all'interno di una piccola placca di travertino in località San Sommeo, poco a monte di Pioraco. La grotta ha un'altezza piuttosto uniforme di ~2 metri, ed è stata lungamente utilizzata come ricovero per le greggi. Il deposito di travertino è molto poroso ma ben compatto, tanto da essere stato utilizzato in passato come pietra da costruzione, come testimoniato dai fronti di scavo ancora visibili sul sito.

La grotta aveva un ingresso naturale, chiuso da uno spesso muro di pietre legate da malta cementizia. L'attuale ingresso è un portale a forma quadrangolare interamente scavato nella roccia, per circa due metri di profondità. Anche all'interno si notano evidenti segni di riadattamento, in particolare nella parete orientale in cui si apre l'ingresso, che è ben sagomata ed assume un profilo molto regolare. In alcuni tratti la conformazione della roccia è più naturale, testimoniando che le operazioni di scavo hanno probabilmente ampliato ed adattato una cavità pre-esistente. Tenuto conto delle importanti modifiche interne, non si può escludere che in passato la grotta possa essere stata utilizzata anche per fini differenti da quelli di semplice ricovero per il bestiame.

GROTTA PUZZONA

Questa grotta deve il suo nome allo

stato di degrado, causato dall'accumulo di rifiuti trasportati dal Fiume Potenza entro il suo ingresso, ubicato nell'alveo e parzialmente occupato dalle acque fluviali. La grotta si trova presso l'abitato di Pioraco e si sviluppa sotto lo sbarramento artificiale che rappresenta il primo salto lungo il letto del fiume all'imbocco della forra dei Vurgacci, in una zona la cui struttura è profondamente influenzata dalle opere idrauliche effettuate nel corso dei secoli. L'interesse della grotta è legato alla sua particolare posizione: dalla caverna di accesso la grotta prosegue in una bassa sala che si sviluppa interamente sotto il letto del fiume. L'alta porosità del travertino consente un costante stillicidio dalla volta, che causa l'accrescimento di concrezioni calcitiche di colore nerastro per l'alto contenuto di inquinanti organici nelle acque del fiume stesso.

GROTTA DEL CASTORO

La Grotta del Castoro è sicuramente la più interessante ed estesa cavità all'interno dei travertini e si sviluppa interamente alla base del grosso deposito di Pioraco. Il suo ingresso, subacqueo, si trova nel letto del Fiume Potenza, nella buca a valle della serie di salti all'uscita della forra dei Vurgacci.

L'ingresso naturale della grotta si evidenzia durante le piene del Potenza, quando l'acqua limpida che sgorga dalla grotta contrasta con l'acqua torbida del fiume. La grotta è stata esplorata dai subacquei del gruppo Speleosub di Ancona nell'autunno 1973. L'esplorazione ha rivelato che in realtà la grotta era già conosciuta, almeno in parte, in quanto dal suo interno si può risalire una breve diramazione che termina in un muro a secco, che blocca un'originaria apertura naturale subaerea. La grotta è stata poi intercettata da un pozzo trivellato realizzato per assicurare il pompaggio dell'acqua uti-

lizzata nelle cartiere. Le successive esplorazioni subacquee degli speleologi del G.S. AL.VA.P. hanno cercato di seguire la vena che alimenta il flusso idrico, fino a raggiungere una stretta ed invalicabile fessura da cui l'acqua si immette con pressione nella galleria.

La grotta si compone di due principali ambienti subaerei, entrambi parzialmente allagati. Il sifone d'accesso, superabile solo con attrezzature subacquee, immette in un primo lago, allo stesso livello del fiume, da cui è possibile procedere senza erogatore; nel secondo ambiente, raggiunto dal pozzo trivellato, è stata lasciata la strumentazione per il monitoraggio idrologico. Alcuni ambienti si sviluppano brevemente verso l'alto, sopra il livello delle acque. Nella progressione è necessario scavalcare alcuni ponti di roccia, ma si avanza principalmente a nuoto nell'acqua, profonda a tratti oltre 2 metri, sfruttando le asperità della roccia per sostenersi e risalire la corrente, continua ma non forte. La bassa temperatura dell'acqua (~11,5 °C) rende comunque indispensabile l'impiego di una muta termica.

La grotta è soggetta ad un intenso e continuo stillicidio dal sovrastante corpo di travertino che causa un'attiva ed intensa azione incrostante. Lo stillicidio è in larga parte di origine naturale, ma presso il primo ambiente c'è un costante apporto di acque derivanti da perdite della rete fognaria che si immettono nella volta.

Le concrezioni hanno struttura irregolare e sono rivestite di coralloidi. Grandi ed informi stalattiti pendono dalla volta, terminando talvolta con una larga punta piatta (*trays*) mentre sono assenti stalagmiti. Nelle zone aggettanti delle volte possono formarsi vere stalattiti, che non hanno però la tipica forma conica, ma sono di struttura estremamente irregolare, con continui cambiamenti della

direzione di accrescimento, rigonfiamenti e strozzature, conformazione tipica di un accrescimento in zone con stillicidio molto intenso.

La fascia concrezionata continua anche sotto il livello delle acque, testimonianza inequivocabile di un innalzamento del livello idrico, dopo che la formazione dei depositi sulle pareti era già avvenuta. La risalita del livello idrico nella grotta va collegata alla deposizione di detriti nel letto del fiume, che ha causato lo spostamento verso l'alto del livello di scorrimento delle acque superficiali e sotterranee.

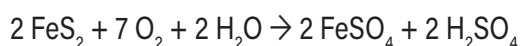
La grotta, seppure alimentata da acque sorgive, è in diretta connessione con il fiume, che influenza direttamente il livello delle acque, ed è frequentata da pesci che risalgono la corrente. Le acque del fiume non hanno mai raggiunto la sala monitorata, mentre possono infiltrarsi facilmente nel primo ambiente della grotta in occasione delle piene, trasportando elementi ghiaiosi e ciottolame arrotondato di natura varia, proveniente dalla parte superiore del bacino idrografico, ma anche detriti di varia natura e rifiuti che galleggiano nel lago-sifone terminale.

Le grotte "ferrifere"

Queste grotte si aprono nei due versanti della valle del Torrente Scarzito, tra gli abitati di Pioraco e Sefro, e si sviluppano principalmente all'interno del Calcare Massiccio in sistemi di fratture ubicati in prossimità del contatto tettonico con le unità calcareo-silicee dei Calcarei Diaspri e della Maiolica. Le Grotte di Marmuschio si aprono sul versante settentrionale della valle, in sinistra idrografica, mentre le Grotte di Piano della Porta, la Grotta della Miniera e la piccola Grotta del Barbiere si trovano sul versante montuoso opposto.

L'alta concentrazione di grotte è legata alle mineralizzazioni limonitiche della roccia, sotto forma di riempimenti di fratture o tasche filoniane. La limonite è una miscela di ossidi e idrossidi di ferro dal colore giallastro o rossiccio, ed è comune nelle rocce giurassiche dell'Appennino come prodotto di alterazione di piccoli depositi di minerali ferrosi, in genere solfuri di ferro, cioè pirite o marcasite. Le analisi effettuate nella Grotta della Miniera rivelano che il principale componente mineralogico è la goethite, associata a minori quantitativi di calcite, quarzo, fluorite e malachite (Garavelli et al., 2012).

Il processo di ossidazione dei solfuri, responsabile della formazione di limonite, contribuisce anche alla dissoluzione del calcare e quindi alla formazione di grotte. La capacità corrosiva delle acque di infiltrazione superficiale è incrementata dagli acidi rilasciati nell'ossidazione dei solfuri a solfati (SO_4^{2-}), in cui si libera acido solforico secondo la reazione schematica:



L'acido solforico (H_2SO_4) reagisce con il calcare producendo gesso (CaSO_4) ed anidride carbonica:



La reazione procede in realtà in forma ionica ed i solfati, molto più solubili del carbonato di calcio, sono facilmente allontanati in soluzione; l'anidride carbonica rilasciata produce un'ulteriore aggressione chimica sul calcare secondo i normali processi carsici.

La possibilità che una grotta si formi interamente a partire da processi di ossidazione delle piriti è stata già documentata, anche per grotte di ampie dimensioni (Morehouse, 1968). Questo meccanismo di corrosione presenta analogie con i processi speleogenetici attivi su larga

scala nelle grotte di Frasassi e coinvolti nella formazione di molti importanti complessi ipogei della regione umbro-marchigiana; in questo caso l'ossidazione dei solfuri procede a partire dall' H_2S disciolto nelle acque sulfuree (Galdenzi, 1990; Galdenzi & Menichetti, 1995). Le grotte ferrifere di Sefro rappresentano il più importante sistema carsico riferibile a processi di ossidazione di depositi piritici nella regione marchigiana.

Le grotte hanno una struttura che dipende dall'andamento dei corpi mineralizzati e delle fratture percorse dalle acque dilavanti. All'interno delle grotte, le acque di infiltrazione hanno proseguito la loro azione con i normali meccanismi legati alla CO_2 disciolta, con azione solvente o incrostante nelle diverse parti della grotta. Nelle zone più carsificate gli originari depositi mineralizzati sono stati quasi totalmente rimossi dalle acque, e si conservano solo in piccole tasche sulle pareti. La colorazione giallastra o rossastra della roccia, delle concrezioni e dei fanghi testimonia comunque la presenza di minerali ferrosi.

Le Grotte di Marmuschio si aprono nelle immediate vicinanze l'una dell'altra sul versante settentrionale del Monte Gualdo, sulla sinistra idrografica del Torrente Scarzito. Pur trattandosi di due grotte fisicamente separate, rappresentano un'unica manifestazione geologica, sviluppata su di una frattura verticale nel Calcare Massiccio. Le grotte hanno un prevalente andamento verticale e raggiungono un dislivello complessivo di ~45 m, dall'ingresso superiore della grotta alta al fondo di quella bassa. I loro ingressi si presentano come strette e profonde trincee nel calcare, con pareti via via più profonde verso l'interno.

La Grotta di Sopra ha due ingressi quasi sovrapposti, collegati da un pozzo ed un breve cunicolo. Ap-

pena a lato, a strapiombo, si apre la Grotta di Sotto, la più estesa ed interessante. Il suo ampio ingresso ha un pavimento costituito da massi di crollo, incastrati tra le pareti verticali, da cui parte un pozzo, profondo 8 m. La grotta prosegue nel suo andamento discendente, tramite un lungo e stretto scivolo, molto inclinato, che dà su di un altro pozzo profondo 12 m, il tutto impiantato nella stessa frattura. Nelle zone più profonde si ha attivo concrezionamento, con colorazioni rossastre che testimoniano la presenza di ferro.

Le Grotte di Piano della Porta, sono un gruppo di piccole cavità sul versante opposto della valle, anche esse in una zona fratturata e mineralizzata del Calcare Massiccio, con filoni sedimentari giurassici. Queste grotte sono assimilabili alle Grotte di Marmuschio per modalità genetiche, sono anch'esse impiantate su fratture ma sono più superficiali ed hanno un andamento sub-orizzontale. In superficie sono inoltre presenti depressioni di crollo e caos di blocchi, entro cui possono aprirsi altri piccoli cunicoli. In molti casi le grotte hanno subito riadattamenti per fini minerari.

Nella stessa zona gli scavi guidati dal G.S. AL.VA.P. hanno portato alla scoperta della Grotta della Miniera, un reticolo di gallerie minerarie, realizzato per l'estrazione dei minerali ferrosi presenti in corpi filoniani presso il contatto tettonico tra Calcare Massiccio e Calcari Diasprigni. La grotta è il risultato dell'opera di scavo e di estrazione che hanno portato ad importanti adattamenti (Garavelli *et al.*, 2012), forse riutilizzando anche preesistenti cavità naturali.

Le grotte non carsiche

Anche se le grotte sono una delle più tipiche manifestazioni carsiche, non tutte le grotte sono di origine

carsica, ed alcune di esse derivano da processi in cui la dissoluzione chimica ad opera delle acque sotterranee gioca un ruolo marginale. Le morfologie simili a quelle tipiche delle aree carsiche prodotte da differenti processi sono spesso dette di tipo pseudocarsico. Nell'area, nonostante la netta prevalenza di rocce carbonatiche solubili, ci sono numerosi esempi di grotte non carsiche, in diversi tipi di situazioni morfologiche (Galdenzi, 2011).

Le più comuni grotte pseudocarsiche si trovano nelle brecce di versante. Questi detriti prodotti in condizioni periglaciali per gelifrazione sono spesso debolmente ed irregolarmente cementati per l'azione incrostante di acque bicarbonatiche. Il grado di cementazione risente delle condizioni locali di flusso e della durata dei processi, e per questo i depositi più antichi sono in genere più cementati. Brecce di questo tipo ricoprono larga parte dei versanti montuosi nelle zone conformate ad impluvio, in genere sotto coperture boschive.

In alcune località le brecce di versante affiorano direttamente, generalmente come conseguenza dell'attività erosiva dei corsi d'acqua, e restano così esposte a processi di disaggregazione e rimozione selettiva degli elementi detritici negli orizzonti meno cementati. Si originano così paesaggi ruinformi o piccole grotte, generalmente molto superficiali.

La Grotta di Ponte San Cassiano, rappresenta il migliore esempio di questa tipologia di cavità. Questa grotta si sviluppa in un versante scosceso al passaggio tra il substrato calcareo (Maiolica) e brecce di versante parzialmente cementate. L'azione combinata della disaggregazione nei livelli poco cementati e del distacco di blocchi da una sovrastante bancata più compatta ha portato alla formazione di una grotta a strut-

tura complessa, con una caverna principale che prosegue in passaggi di andamento articolato tra i grossi blocchi accumulati sul pavimento nella parte più esterna.

Un altro tipo di grotta non carsica deriva dalle decompressioni meccaniche delle rocce che causa l'allargamento di preesistenti discontinuità, fenomeno abbastanza comune in prossimità di pareti rocciose, soprattutto se le fratture sono sub-parallele al versante stesso. Simile origine ha la Grotta dei Falsari, una profonda spaccatura verticale che si apre sul costone roccioso in sinistra idrografica all'uscita della Gola di Pioraco. Il costone corrisponde all'emergenza in affioramento dell'importante sovrascorrimento di Monte Primo – Monte Cavallo; i calcari sono particolarmente compatti ed in rilievo morfologico per effetto dei processi di ricristallizzazione, e sono attraversati da un'insieme di fratture sub-parallele tra loro e al versante. Il costone roccioso assume così una conformazione particolare, con la roccia tagliata in grossi gradoni con superfici piate e angoli netti, su cui agisce direttamente la corrosione carsica ad opera delle acque piovane. Le fratture per effetto dei fenomeni di decompressione si allargano e divengono beanti, facilitando anche l'infiltrazione dell'acqua nell'ammasso roccioso. La Grotta dei Falsari si apre in una di queste fratture, ed al suo interno lo scorrimento di acque di infiltrazione produce un'azione solvente e di deposito, anche se questi fenomeni sono di secondaria importanza nella formazione del vuoto. La grotta è interessata da un significativo flusso di aria, favorito dall'intensa fratturazione della roccia.

Sviluppo ed Evoluzione del Carsismo Ipogeo

Le grotte carsiche sono quella parte della rete drenante sotterranea direttamente esplorabile dall'uomo. Nonostante nell'area di studio siano conosciute oltre 50 grotte, in larga parte di origine carsica, le conoscenze dirette si limitano alle zone più superficiali dei massicci carsificati, ed una sola grotta, quella di Sasso Pozzo, raggiunge zone relativamente profonde.

L'ampia varietà dei fenomeni tuttavia rende conto della complessità del processo carsico e consente un'articolata discussione dei molteplici fattori, di tipo idrologico, chimico, litologico, morfologico e climatico che influenzano la storia evolutiva delle grotte, anche in relazione al ruolo idrologico attuale e passato.

Struttura e morfologia delle grotte

La natura litologica delle rocce e l'azione solvente delle acque sotterranee determinano un'elevata permeabilità del mezzo roccioso, ben testimoniata dallo scarso sviluppo delle rete drenante superficiale nelle dorsali montuose. In linea generale prevale un assorbimento diffuso attraverso la rete di fessure, con l'eccezione dei Piani di Monte Lago, dove si ha assorbimento concentrato tramite inghiottitoi.

Sulle dorsali sono abbastanza comuni grotte sub-verticali formate da uno o più pozzi in rapida successione, generalmente impostati su fratture. Queste grotte raggiungono

una bassa profondità a causa di riempimenti clastici che impediscono di seguire eventuali prosecuzioni; la maggioranza di esse si trova in un avanzato stadio di evoluzione ed alcune, originate in un differente contesto morfologico, sono totalmente escluse dai flussi idrici attuali, come la Buca della Vecchia e la Grotta dei Fucili. Nella parte più esterna di queste grotte prevale l'azione solvente delle acque d'infiltrazione, che corrodono le preesistenti concrezioni calcitiche eventualmente presenti.

La posizione delle grotte non è correlabile alla rete idrica superficiale. Alcune grotte verticali si aprono direttamente sulle superfici di assorbimento, ad esempio il Pozzo di Pian de' Morri o la Buca di Sasso Freddo, ma più spesso i pozzi si trovano ai margini delle dorsali, dove sono tagliati dall'arretramento del versante nei solchi vallivi, come avviene per la Grotta di Caprelle ed il Pozzo di Fonte Fragola.

L'ampia dimensione dei vuoti, la lunga storia evolutiva, l'abbondanza di materiali clastici e la casualità delle comunicazioni con l'esterno fanno ritenere probabile che all'interno dei rilievi calcarei grotte verticali con funzione assorbente siano in realtà più comuni di quanto rilevabile con la diretta esplorazione.

All'interno delle valli le grotte hanno per lo più un andamento sub-orizzontale, ma anche in questo il breve sviluppo consente di accedere solo alle zone esterne del massiccio carsificato. Escludendo antri, caverne e

fessure prodotte dai processi di alterazione superficiale o addirittura da processi pseudocarsici, la maggior parte di queste grotte è riconducibile al ruolo di emergenza carsica, attiva o fossile. Questo tipo di grotta si trova generalmente presso il fondovalle, sia delle valli maggiori che dei tributari, e può svilupparsi in tutte le unità litologiche, dal Calcare Massiccio ai calcari pelagici, fino ai travertini.

Le grotte di Figareto e Sasso Pozzo rappresentano esempi della più comune tipologia di emergenze carsiche nella regione (Galdenzi, 1988), formate da gallerie tubolari poco ramificate, a sezione longitudinale irregolare con tratti sifonanti e contropendenze negli acquiferi di Scaglia o Maiolica sui fianchi delle pieghe. Altre piccole grotte o emergenze attive sono note all'interno delle valli maggiori, con caratteristiche differenti, in relazione alla litologia ed alle condizioni idrologiche locali (Grotta di Tonio, Grotta del Castoro, Risorgente di Madonna dei Calcinai).

Poche emergenze attive si trovano anche a quote superiori nei versanti, in differenti situazioni. La Grotta della Botte è una sorgente di strato. Le piccole grotte fossili di Sasso Forca si aprono ben al di sopra dell'attuale livello locale di base, in orizzonti meno permeabili della Scaglia Rossa. Nella Grotta Piccola di Caprelle il flusso idrico non è invece influenzato da variazioni di permeabilità di origine stratigrafica; le gallerie carsiche si trovano oltre 200 m sopra il fondovalle, ed è probabile che la loro formazione sia iniziata quando il livello di base era a quote più elevate.

L'attuale rete drenante

L'attuale rete drenante consente un rapido trasferimento delle acque meteoriche verso le emergenze, ma si osservano significative differenze

nella permeabilità e nelle modalità di circolazione, in particolare tra i flussi verticali nella zona di trasferimento vadoso e i drenaggi delle acque nelle maggiori falde idriche.

LA ZONA DI TRASFERIMENTO VADOSO

L'infiltrazione delle acque meteoriche, sia diffusa che concentrata, alimenta una circolazione sotterranea che in larga parte si svolge in senso verticale attraverso una rete drenante con dimensioni molto varie, dalle microfessure fino ai canali carsici. La rete di microfessure consente una lenta percolazione delle acque verso il basso, con un'azione che può risultare sia solvente che incrostante, generando in questo caso le tipiche concrezioni che ornano le grotte. I canali più ampi, prodotti per soluzione carsica, consentono invece un drenaggio rapido delle acque.

La possibilità di flussi veloci è particolarmente evidente nell'inghiottitoio di Monte Lago. Nei periodi di alta portata i drenaggi sono così rapidi che le acque superficiali non hanno neppure il tempo di equilibrarsi termicamente con la roccia e in poche ore raggiungono la risorgenza temporanea di Valle San Giovanni.

Il caso di Monte Lago è particolare, per la presenza di un inghiottitoio localizzato, ma indicazioni simili si hanno anche nelle grotte a pozzo, dove in risposta alle condizioni meteorologiche si può passare dal lento stillicidio ad un ruscellamento diffuso. Anche la risposta delle sorgenti monitorate e la veloce risalita dei livelli piezometrici nella grotta Sasso Pozzo, fino a oltre 40 m in poche ore, conferma la possibilità di un rapido afflusso di ingenti quantitativi di acque meteoriche verso le zone profonde degli acquiferi.

La permeabilità ed il grado di carsificazione nella zona vadosa non sono uniformi, ed il minor grado di carsificazione raggiunto dall'ammasso

roccioso nelle zone profonde giustifica l'esistenza di emergenze idriche a quote elevate rispetto al livello di base locale, come la Grotta Piccola di Caprelle e le emergenze minori presso Sasso Pozzo, non sostenute da variazioni di permeabilità imputabili a fattori litologici o stratigrafici.

I FLUSSI FREATICI

Gli apporti di acque meteoriche alimentano falde idriche in cui prevalgono flussi più lenti principalmente per vie orizzontali. Esistono tuttavia differenze tra le falde di base e le falde idriche sospese, il cui livello è sostenuto da variazioni di permeabilità nella sequenza carbonatica.

Nelle falde minori la portata e le caratteristiche chimico-fisiche risentono in maniera sensibile delle condizioni stagionali; l'irregolarità del drenaggio è dovuta sia alla piccola dimensione dei bacini di alimentazione, sia ai sistemi di fessure e di canali carsici, attraverso cui si può avere un rapido apporto di acque meteoriche dall'alto e un rapido smaltimento verso le sorgenti. Anche la capacità di ritenzione delle rocce risulta variabile. A Figaretto si è verificato il totale prosciugamento della sorgente, mentre nella Grotta Piccola di Caprelle permane un significativo deflusso anche nella stagione estiva, seppure la grotta si trova ben al di sopra del livello di base locale.

Il deflusso ed i parametri fisico-chimici molto più regolari negli acquiferi di base (Sorgente San Giovanni e Grotta del Castoro) sono invece compatibili con un drenaggio che avviene principalmente tramite una rete di fessure, piuttosto che attraverso canali carsici. Apporti rapidi di acque di infiltrazione possono raggiungere gli acquiferi di base, dove tuttavia si registrano variazioni dei parametri chimico-fisici di entità molto bassa per una breve durata; gli apporti di acque vadoze si dilu-

iscono infatti nella falda idrica che risente di variazioni stagionali molto smorzate di deflusso, temperatura e conducibilità.

Più complesso il comportamento della Sorgente Bagno, a Fiuminata, in cui le acque della falda idrica che seguono i circuiti superficiali si miscelano con minori quantitativi di acque mineralizzate che risalgono dal basso, con un chimismo finale che risente dell'importanza relativa dei due apporti. Le acque meteoriche influenzano direttamente i gradienti idraulici e la portata della sorgente, interferendo con la quantità di acqua che risale dai circuiti profondi. L'abbassamento dei livelli idrici dovuto alla perdurante siccità ha causato anche una diminuzione dei carichi idrostatici e, in conseguenza, anche degli apporti profondi e del contenuto salino alla sorgente; al termine della stagione piovosa l'incremento della concentrazione di molti ioni è al contrario imputabile ad una concomitante ripresa dei flussi dal basso.

L'evoluzione speleogenetica

In tutta l'area lo sviluppo del carsismo sotterraneo è legato principalmente all'azione solvente delle acque meteoriche arricchite di CO_2 che fluiscono all'interno del massiccio calcareo attraverso circuiti superficiali. Fanno eccezione le grotte "ferrifere" di Marmuschio e di Piano della Porta nella valle del T. Scarzito, la cui origine è più probabilmente riconducibile alla presenza di originarie mineralizzazioni piritiche nella roccia, la cui ossidazione da parte delle acque di infiltrazione meteorica può aver generato l'aggressività chimica delle acque, accentuando le azioni corrosive.

L'assenza di estese coperture marine sopra le dorsali ha ostacolato

la formazione di una rete drenante superficiale, cosicché prevale un assorbimento diffuso attraverso la rete di fessure. Fanno eccezione i piani chiusi di Piani di Monte Lago, formati in un differente contesto morfologico all'interno di una zona strutturalmente depressa drenata tramite inghiottitoi e parzialmente colmata da depositi fini.

Le unità marnose poco permeabili hanno invece un ruolo importante per la circolazione sotterranea e la speleogenesi, in particolare negli acquiferi di Maiolica e Scaglia, compresi tra due acquicludi. Le unità marnose non impediscono contatti idraulici tra i diversi acquiferi alla scala dell'intera struttura, ma localmente isolano piccoli bacini idrogeologici, in cui si possono mantenere circuiti idrici separati, come verificato in Valle San Giovanni, dove le acque inghiottite nei Piani di Monte Lago nei periodi di alta portata attivano la risorgenza temporanea senza influenzare in maniera significativa la vicina Sorgente San Giovanni.

Negli acquiferi sospesi di Maiolica e Scaglia, sui fianchi delle pieghe dove gli strati sono verticali o molto inclinati si creano condizioni idrodinamiche favorevoli alla speleogenesi. Gli acquicludi al letto ed al tetto delle unità calcaree mantengono flussi freatici concentrati lungo direttrici parallele all'asse della struttura, favorendo lo sviluppo di gallerie drenanti carsiche, generalmente impostate lungo gli interstrati.

Le grotte nell'area si trovano in stadi di sviluppo molto differenti, da grotte attive, in stadi relativamente precoci della loro evoluzione, a grotte ormai soggette a soli processi di riempimento. Spesso si riconoscono i segni di una lunga e complessa storia, in cui diversi stadi si sono succeduti, con sovrapposizioni di morfologie e processi attribuibili alle differenti fasi evolutive. A questo ampio gruppo di

cavità appartengono tutti i maggiori complessi dell'area, come la Grotta di Caprelle e Sasso Pozzo, ma anche molte delle altre grotte conosciute.

Oltre che dalle osservazioni geomorfologiche la possibilità di una storia evolutiva lunga ed articolata è dimostrata anche dai dati di cronologia assoluta acquisiti nelle grotte di Caprelle e nel Pozzo di Fonte Fragola, in cui i depositi di calcite hanno fornito età fino a 100.000 anni. Questi dati, relativi a campioni raccolti direttamente sulle pareti, consentono di affermare che nel Pleistocene superiore queste grotte avevano già raggiunto l'attuale configurazione morfologica, e che pertanto le fasi principali del loro sviluppo si erano svolte precedentemente.

Le prime fasi speleogenetiche sono attribuibili ad un periodo in cui il livello di base si trovava a quote più elevate di quelle attuali. Ciò è probabile per la maggioranza delle grotte assorbenti che si aprono sulle superfici sommitali delle dorsali o ai loro margini, ma anche per alcune grotte-emergenza poste a quote relativamente elevate sul fondovalle, come Sasso Pozzo (Galdenzi, 2013), la Grotta Piccola di Caprelle e le grotte di Sasso Forca.

L'approfondimento dell'idrografia prodottosi a partire dalla fine del Pleistocene inferiore ha modificato le condizioni di equilibrio pre-esistenti, causando il progressivo abbassamento del livello locale di base e spostando verso il basso la zona di deflusso delle acque freatiche. In conseguenza di ciò, le vie drenanti per le acque freatiche si sono spostate verso il basso, e le antiche gallerie drenanti sono così state abbandonate. Nella zona vadosa, al contrario, l'abbassamento del livello di base non ha modificato le condizioni generali di drenaggio; l'acqua d'infiltrazione ha continuato a svolgere la sua azione nella parte

superiore dell'ammasso roccioso, ed alcune delle grotte sub-verticali possono aver mantenuto la loro funzione idrologica originaria. Tralasciando le variazioni locali, la carsificazione nella zona più profonda degli acquiferi non ha in genere raggiunto un grado di sviluppo paragonabile a quello esistente nella zona vadosa, contribuendo a giustificare quindi la riduzione di permeabilità osservata negli acquiferi ed il tipo di risposta delle sorgenti agli apporti meteorici.

Bibliografia

ACQUILANTI L., CLEMENTI F., LANDOLFO S., NANNI T., PALPACELLI S., TAZIOLI A. (2013) – *A DNA tracer used in column tests for hydrogeology applications*. Environmental Earth Sciences, 70, 3143-3154.

AMBROSETTI P., CARRARO F., DEIANA G., DRAMIS F. (1982) – *Il sollevamento dell'Italia Centrale tra il Pleistocene inferiore e il Pleistocene medio*. C.N.R., P.F. "Geodinamica", pubbl. 513, p II, 219-223.

BAMBINI R. & GALDENZI S. (1994) – *Le grotte epigeniche nell'Appennino Umbro - Marchigiano*. Atti XVII Congr. Naz. Speleol. Castelnuovo Garfagnana (LU), 253-258.

BARTOLINI C., D'AGOSTINO N., DRAMIS F. (2003) – *Topography, exhumation, and drainage network evolution of the Apennines*. Episodes, 23 (3), 212-217.

BOCCHINI A., FONTANA A., MELELLI P. (1980) – *Note di confronto tra le cavità 29 V.T. Bus del Diaol e 93 Ma Mc Risorgenza di Gagliole*. Atti 1° Congresso Triveneto di Spe-

leologia, 6-8 December 1980, Treviso, 18-24.

BONI C., BONO P., CAPELLI G. (1986) – *Schema idrogeologico dell'Italia Centrale*. Memorie della Società Geologica Italiana, 35, 991-1012.

CALAMITA F. & PIERANTONI P.P. (1993) – *Il sovrascorimento di M.Cavallo-M.Primo (Appennino umbro-marchigiano)*. Bollettino Società Geologica Italiana, 112, 825-835.

CANAVARI M. (1928) – *Manuale di geologia tecnica con speciale riguardo alle applicazioni per l'ingegneria*. Nistri, Pisa, pp. 672.

CATTUTO C. & PASSERI L. (1974) – *Relazioni tra idrologia carsica e litologia nell'area Umbro Marchigiana*. Rass. Speleol. It., Mem. XI, Vol. 1, 227-238.

CENTAMORE E., IDROTECNICO, VALLETTA M. (1976) – *Note illustrative alla carta idrogeologica F° 291 Pergola*. Serv. Geol. d'It., Roma.

CICCACCI S., D'ALESSANDRO L., DRAMIS F., FREDI P., PAMBIANCHI G. (1985) – *Geomorphological and neotectonic evolution of the Umbria-Marche Ridge, Northern Sector*. Studi Geologici Camerti, 10, 7-15.

D'AGOSTINO N., DRAMIS F., FUNICIELLO R., JACKSON J.A. (2001) – *Interactions between mantle upwelling, drainage evolution and active normal faulting: an example from the central Apennines (Italy)*. Geophysical Journal International, 147, 475-497.

DEIANA G. (Ed.) (2009) – *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000*. Foglio 302 Tolentino, Servizio Geologico d'Italia.

DRAMIS F. & DEIANA G. (1972) – *Le sorgenti della provincia di Macerata*. vol. 2, Camera di Commercio, Industria, Agricoltura e Artigianato, Macerata, 156.

FALASCHI P.L. (1987) – *La signoria di Giulio Cesare da Varano, in Camilla Battista da Varano e il suo tempo*. Atti del Convegno di Studi sul V centenario del Monastero delle Clarisse di Camerino (Camerino 7-9 settembre 1984), Camerino, 31.

FORD D.C. & EWERS R.O. (1978) – *The development of cave systems in the dimensions of length and breadth*.

Canadian Journal of Earth Sciences, 15, 1783-98.

FOSSA MANCINI E. (1916) – *Studio geologico di tre sorgenti proposte per l'acquedotto di Jesi*. Mem. Soc. Tosc. Sc. Nat., 31, 3-22.

GALDENZI S. (1983) – *Geomorfologia delle grotte di Caprelle*. In: Atti XIV Congresso nazionale di speleologia, Bologna 1982. Le Grotte d'Italia, s. IV, 11, 443-452.

GALDENZI S. (1988) – *Il carsismo nei calcari pelagici dell'Appennino Umbro Marchigiano: il ruolo degli orizzonti impermeabili nella canalizzazione sotterranea in una catena a pieghe*. In: Actes XIV Cong. Nat. Speleol. (Nancy-Metz, 1985), Spelunca Memories, 14, 143-146.

GALDENZI S. (1990) – *Un modello genetico per la*

Grotta Grande del Vento. In: Galdenzi S. & Menichetti M. (Eds.), *Il carsismo della Gola di Frasassi*, Memorie Istituto Italiano di Speologia, s. II, v. 4, 123-142.

GALDENZI S. (1996) – *Il carsismo profondo nell'Appennino Umbro Marchigiano (Italia)*. Proceedings International Congress "Alpine Caves: Alpine Karst Systems and their Environmental Context", Asiago, 11-14 June 1992, 229-242.

GALDENZI S. (2004) – *Il carsismo nella regione marchigiana*. In: Galdenzi S. (Ed.) - Frasassi 1989-2004: gli sviluppi nella ricerca, Jesi. 6-20.

GALDENZI S. (2011) – *Pseudokarst landforms on the Adriatic side of the north-east Apennine (Italy)*. In: Proceedings 11th International Symposium on Pseudokarst, 11-16 May 2010, Saupsdorf, Germany, 56-71.

GALDENZI S. (2013) – *Le grotte di Caprelle. Aspetti geologici e geomorfologici*. In: Cucchi F. & Guidi P. (Eds.), Atti 21° Congresso Nazionale di Speleologia, Trieste, 2-5 giugno 2011, sessione Poster, 537.

GALDENZI S. (2013) – *Sasso Pozzo cave (Gagliole, Italy): hydrology and speleogenetic*

evolution. Alpine and Mediterranean Quaternary, 26 (1), 65-76.

GALDENZI S. & CAMPAGNOLI A. (2013) – *La circolazione carsica nel fianco di anticlinali dell'Appennino Marchigiano: l'esempio della grotta Sasso Pozzo (Gagliole)*. In: Cucchi F. & Guidi P. (Eds.), Atti 21° Congresso Nazionale di Speleologia, Trieste, 2-5 giugno 2011, 399-410.

GALDENZI S. & MENICHETTI M. (1995) – *Occurrence of hypogenic caves in a karst region: examples from Central Italy*. Environmental Geology, 26, 3947.

GALDENZI S., PAGGI S., PISTOLESI E. (2008) – *Gagliole: le rocce, le grotte*. Tipografia Grafostil, Matelica, pp. 96.

GALDENZI S., PAGGI S., PISTOLESI E. (2008) – *Le grotte di Sefro*. UTJ, Jesi, pp. 32.

GALDENZI S., PAGGI S., PISTOLESI E. (2009) – *Fiuminata. Le grotte di Monte Bordinno*. UTJ, Jesi, pp. 32.

GALDENZI S., PAGGI S., PISTOLESI E. (2012) – *Pioraco. L'acqua, la roccia, le grotte*. UTJ, Jesi, pp. 64.

GALDENZI S., PAGGI S., PI-STOLESI E., COTECHINI G. (2008) – *Grotte e Carsismo nel territorio di Sefro*. In: Di Martino V., Pedrotti F., Valeriani P. (Eds.), Atti Convegno "Per l'istituzione del Parco Naturale Regionale dell'area Monte Pennino, Vallescurosa e Montelago", Sefro, 14 ottobre 2006. Tipografia Editrice Terni, 41-62.

GARAVELLI A., LAROCCA F., LEVATO C., PINTO D. (2012) – *Grotta della Miniera, Sefro (Marche, Italy)*. 2nd Mining in European History-Conference, The Impact of Historic and Prehistoric Mining Activities on the Environment and Societies in Europe (Innsbruck, November, 7th-10th, 2012).

MINETTI A., NANNI T., PERILLI F., POLONARA L., PRINCIPI M. (Eds.) (1991) – *L'ambiente Fisico delle Marche*. Regione Marche, Giunta Regionale, S.EL.CA, Firenze, pp. 256.

MOREHOUSE D.F. (1968) – *Cave development via the sulfuric acid reaction*. Bulletin of the National Speleological Society, 30 (1), 1-10.

NANNI T. (1991) – *Caratteri idrogeologici delle Marche*. In: Minetti A., Nanni T., Perilli F., Polonara L., Principi M. (Eds.), *L'ambiente Fisico delle Marche*, Regione Marche, Giunta Regionale, S.EL.CA, Firenze, 115-209.

NANNI T. & VIVALDA P. (1999) – *Le acque solfuree della regione marchigiana*. Bollettino Società Geologica Italiana, 118 (3), 585-599.

NANNI T. & VIVALDA P. (2005) – *The aquifers of the Umbria-Marche Adriatic region: relationship between structural setting and groundwater chemistry*. Bollettino Società Geologica Italiana, 124 (3), 523-542.

PASSERI L. (1972) – *Ricerche sulla porosità delle rocce carbonatiche nella zona di M.te Cucco (Appennino Umbro Marchigiano) in relazione alla genesi della canalizzazione interna*. Le Grotte d'Italia, (4) III, 5-55.

SHUSTER E.T. & WHITE W.B. (1971) – *Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers*. Journal of Hydrology, 14, 93-128.

VOLTAGGIO M. (2010) – *Relazione riguardante i campioni esaminati per spettrometria di massa provenienti dalla località Piani di Monte Lago*. Rapporto inedito IGAG per il Gruppo Grotte Recanati, pp. 8.

Sommario

Introduzione	1
L'ambiente Geologico	3
La conformazione geografica.	3
Inquadramento geologico e geomorfologico regionale	3
<i>Giurassico-Miocene</i>	<i>3</i>
<i>Pliocene e Quaternario</i>	<i>4</i>
Caratteri idrogeologici regionali	6
<i>Unità litostratigrafiche e complessi idrogeologici</i>	<i>6</i>
<i>La circolazione sotterranea</i>	<i>8</i>
La dorsale di Monte Lago: Le Acque Sotterranee.	9
La struttura geologica	9
Le sorgenti.	9
Il monitoraggio	10
Inghiottitoio di Monte Lago	11
Sorgenti acquiferi minori	12
<i>Grotta Piccola di Caprelle.</i>	<i>12</i>
<i>Sorgente di Figareto</i>	<i>13</i>
Sorgenti acquifero di base	14
<i>Grotta del Castoro</i>	<i>14</i>
<i>Sorgente San Giovanni (Sefro)</i>	<i>15</i>
<i>Sorgente Bagno</i>	<i>16</i>
Monitoraggio 2010 dei Piani di Monte Lago – Valle San Giovanni . .	17

Chimica acque	.18
<i>Acque bicarbonatiche</i>	18
<i>Sorgente Bagno</i>	20
Caratteri isotopici	.21
<i>Isotopi acque</i>	21
<i>Carbonati</i>	22
<i>Solfati</i>	22
La dorsale di Monte Lago: Grotte e Carsismo	25
Il carsismo superficiale	25
Il carsismo profondo	25
I Piani di Monte Lago	26
Le grotte di Caprelle	28
<i>Morfologia</i>	28
<i>Riempimenti</i>	29
<i>Speleogenesi</i>	30
Le grotte verticali	.31
<i>La Callarella</i>	31
<i>Pozzo di Fonte Fragola</i>	31
<i>Altre grotte</i>	32
Grotte orizzontali	32
<i>Grotte di Sasso Forca</i>	32
<i>Grotta della Botte</i>	33
<i>Le grotte di Figareto</i>	33
<i>Grotte minori</i>	33
I travertini	34
<i>Grotta di San Sommeo</i>	35

<i>Grotta Puzzona</i>	35
<i>Grotta del Castoro</i>	35
Le grotte "ferrifere"	36
Le grotte non carsiche	38
Struttura e morfologia delle grotte	41
L'attuale rete drenante	42
<i>La zona di trasferimento vadoso</i>	42
<i>I flussi freatici</i>	43
L'evoluzione speleogenetica	43