# La circolazione carsica nel fianco di anticlinali dell'Appennino Marchigiano: l'esempio della grotta Sasso Pozzo (Gagliole)

SANDRO GALDENZI[1], ALFREDO CAMPAGNOLI [2]

[1] Viale Verdi, 10 – Jesi
[2] Gruppo Grotte Recanati

## Abstract

In the Umbria-Marche Apennines small aquifers, often perched above the main base level, are present in the limestones interbedded with marls. Many small caves related to this type of aquifers are known in the limbs of anticlines. Sasso Pozzo is the most important cave in a similar setting, and it was studied together with the nearby Mignano Spring to define the conditions of karst caves development and the characteristics of groundwater drainage.

The cave is a temporary karst emergence, consists of a main tube 500 m long, with few lateral branches for a total length of ~ 600 m, and reaches the piezometric surface in its termination, -29 m below the entrance. It exhibits typical phreatic features, with prevailing inclined passages and common siphoning zones. The passages have a small size (diameter 1-2 m) and their walls are covered by scallops.

The marl Formation underlying limestone has an important role in concentrating the seepage water from the ridge to the limb of the anticline, where the limestone is sandwiched between poorly permeable beds. The cave formed in this geologic setting due to the ground-water flow parallel to bedding in the saturated zone. During the Middle and Upper Pleistocene, the deepening of the surface streams eroded the marl cover and caused the drop of the water table, so that the cave was abandoned by the ground-water. After this event, the invasion of ground-water became occasional and the cave evolved mainly in vadose conditions.

The ground-water monitoring and a detailed survey in the cave clarified the hydraulic behaviour of the cave. A high hydraulic gradient exists between the spring and the ground-water in the cave, probably due to the low permeability of the limestone in the phreatic zone of the aquifer. The water characteristics and the hydrodynamic are similar in the cave and in the spring, and are influenced by the fast recharge of infiltration water from the karst surface.

The meteoric water reaches the saturated zone in a few hours through a network of fractures and small karst passages existing in the vadose zone. This fast recharge of infiltration water is not drained through the normal pathway due to the low karstfication rate in the phreatic zone, and the flooding events causes important and fast rises (up to 16 m/h) of the ground-water. The piezometric level increases over 45 m and the cave is completely flo-oded by water that rises from the terminal lake and reaches the surface. In the remaining periods, the cave remains dry, excluding some siphons that can be filled by the seepage water descending in the vadose zone.

## Keywords

Umbro-Marchigiano Appennines, Karst Hydrology, Cave

## Riassunto

Sasso Pozzo è la più importante grotta conosciuta negli acquiferi minori presenti sui fianchi delle anticlinali dell'Appennino Marchigiano, ed è stata studiata insieme alla vicina sorgente di Mignano (Gagliole, MC) per acquisire dirette informazioni sulle modalità di drenaggio in questo tipo di acquiferi.

La grotta si sviluppa in un'unità calcarea compresa entro orizzonti marnosi al letto e al tetto, la cui giacitura ha condizionato il drenaggio e la struttura in grande della grotta, che si sviluppa parallelamente al versante, secondo l'andamento della stratificazione, mantenendosi circa 130 m sotto la superficie topografica per lo più sotto coperture marnose. La grotta, di origine freatica, si comporta attualmente da emergenza di troppo pieno ed è formata da un'angusta galleria lunga 500 m, dalla quale si dipartono poche diramazioni laterali. La grotta ha andamento discendente e profilo longitudinale irregolare, con tratti sifonanti e frequenti contropendenze. Raggiunge la superficie dell'acquifero a -29 m rispetto all'ingresso.

Una livellazione di dettaglio ed il monitoraggio idrologico continuo protrattosi per un anno, con tre stazioni interne ed una presso la sorgente, hanno consentito di definire la geometria delle grotta e di seguire le variazioni assolute dei livelli idrici in risposta agli eventi meteorologici superficiali.

La temperatura e la conducibilità delle acque nella grotta e alla sorgente sono molto simili e seguono lo stesso trend stagionale. L'alta permeabilità dell'ammasso roccioso nella zona vadosa causa risposte molto rapide agli eventi meteorici di superficie, mentre una riduzione di permeabilità nelle zone più profonde nell'acquifero giustifica l'elevato gradiente piezometrico misurato tra la grotta e la sorgente.

In occasione di importanti eventi meteorici si verifica una rapida risalita dei livelli piezometrici, fino a 16 m/h, per un totale di +45 m rispetto al livello di magra. In queste situazioni la risalita di acqua dal lago sifone terminale determina la riattivazione della grotta che viene totalmente invasa dalle acque fino a defluire dall'ingresso.

## Parole Chiave

Appennino Umbro-Marchigiano, idrologia carsica, grotta

## Introduzione

Nella regione marchigiana l'esistenza di una circolazione carsica è testimoniata dall'assenza di deflusso superficiale sulle dorsali montuose e dalle caratteristiche idrologiche di molte emergenze. Sulle dorsali montuose prevale un assorbimento diffuso, mentre forme carsiche tipiche, come le doline, sono poco comuni. Solo nelle zone centro meridionali ci sono alcuni polje con emissari sotterranei (Piani carsici).

Le conoscenze dirette sulle modalità di drenaggio all'interno degli acquiferi carsici della regione non sono molto sviluppate: le numerose grotte conosciute hanno in genere scarsa estensione, e consentono una diretta esplorazione solo di zone superficiali dei massicci carsificati. Le maggiori grotte sono ipogeniche, come Frasassi, Monte Cucco ed Acquasanta Terme, e la loro formazione è legata ad emergenze attuali o passate di acque sulfuree risalenti dal basso (Galdenzi & Menichetti, 1995). Queste situazioni sono pertanto poco rappresentative delle normali condizioni che si realizzano all'interno dei massicci carsici. Le grotte epigeniche, scavate cioè dalle acque meteoriche di provenienza superficiale, sono classificabili in due principali tipologie (Galdenzi, 1988): sistemi di pozzi e piccole gallerie inclinate che si estendono nella zona vadosa, raramente esplorate oltre 100 m dalla superficie; piccole grotte sub-orizzontali sui fianchi delle dorsali che, sebbene stiano a quote relativamente elevate rispetto alla rete idrica di fondovalle, fungono spesso da emergenze, attive o temporanee. La grotta Sasso Pozzo è la più lunga emergenza carsica di questo tipo conosciuta in tutta la regione, e lo studio delle sue caratteristiche consente di ottenere dirette informazioni sulla circolazione carsica in zone dell'acquifero normalmente non accessibili ad una diretta esplorazione. Nel presente lavoro saranno illustrati i risultati dei rilievi e delle attività di monitoraggio effettuate, con riferimento al ruolo idrologico della grotta ed alle modalità di drenaggio dell'acquifero carsico.

## Metodologia

Nello studio sono state utilizzate informazioni di tipo geologico ed idrologico, supportate da una revisione di cartografia geologica 1:10.000 (Galdenzi et al., 2008) e topografia della grotta (Bocchini et al., 1980). Una poligonale di controllo per i dislivelli è stata realizzata ex novo utilizzando una livella elettronica di precisione, fissando 40 stazioni di misura dall'ingresso al fondo della grotta (precisione misure: circa 3 mm ogni lettura). Il rilievo della grotta è stato poi ridisegnato basandosi sui dati originali della poligonale effettuata con bussola, inclinometro e fettuccia metrica (Bocchini et al., 1980) nel periodo 1979-1981, sui dati della livellazione e sulle nuove osservazioni morfologiche. La revisione del rilievo si è resa indispensabile per la corretta interpretazione del regime idrologico.

Le acque sotterranee sono state monitorate mediante quattro *datalogger*, di cui due dotati di sensori per la registrazione di livello idrico, temperatura e conducibilità, e due per l'acquisizione di livello idrico e temperatura. Un sensore barometrico è stato utilizzato per la compensazione delle misure di livello. La registrazione dei dati idrologici è stata portata avanti da ottobre 2007 a ottobre 2008, con intervallo di misura di 1 ora. I dati idrologici sono stati integrati con dati pluviometrici acquisiti dalla Società Multiservizi Spa di Ancona sul Monte Lavacelli, ai margini del bacino idrogeologico in cui si colloca la sorgente. Il pluviometro, privo di scandiglia anticondensa, non fornisce valori pienamente affidabili per le nevicate del 19-20 e 22-23-24 marzo 2008.

## Inquadramento geografico e geologico dell'area

La grotta si apre sul fianco occidentale della grande piega antiforme che costituisce l'intera dorsale montuosa del Monte San Vicino (Fig. 1). Questa struttura è formata da terreni calcarei della successione meso-cenozoica sovrascorsi verso est sulla unità terrigene del Messiniano (Deiana, 2009). Nell'area studiata i terreni giurassici sono esposti soltanto nella parte più profonda della valle dell'Elce (Fig. 2), mentre le unità calcaree cretaciche affiorano estesamente. In particolare, la Scaglia rossa affiora in larga parte della dorsale nel Monte Lavacelli. Le unità calcaree hanno generalmente spessore ridotto rispetto ad altre zone del Bacino Umbro Marchigiano.

Nell'area non ci sono faglie di elevato rigetto, se si escludono quelle legate alla tettonica giurassica che interessano però solo i livelli inferiori della successione, e le unità sedimentarie immergono verso OSO, sul fianco occidentale dell'anticlinale. L' inclinazione degli strati cresce progressivamente verso ovest (Fig. 3), passando da 10°-15° presso il nucleo della piega a valori di circa 40° tra la grotta e la Sorgente Mignano, per poi crescere fino ad avere strati verticali o addirittura ribaltati nelle successioni terrigene mioceniche che bordano la dorsale calcarea. Il modellamento del paesaggio ha fortemente risentito dell'azione erosiva delle acque incanalate, più pronunciato nei terreni delle unità marnose, progressivamente erosi sui fianchi delle dorsali montuose. Profonde incisioni vallive ci sono anche entro la stessa dorsale calcarea, dove tuttavia non si ha un deflusso permanente. Forme dolci prodotte in una precedente fase di modellamento con minore energia di rilievo sono riconoscibili sui versanti e soprattutto alla sommità della dorsale.

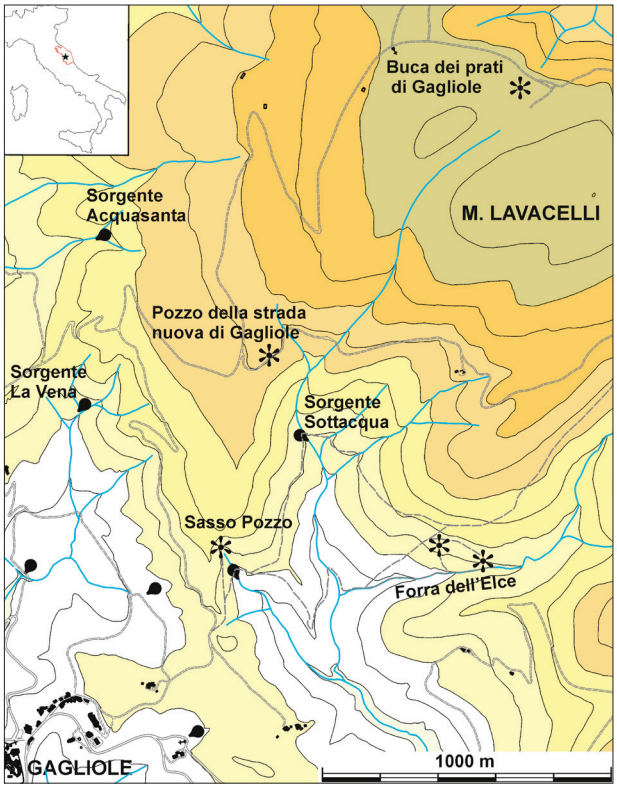



**Fig. 1 Topografia dell'area di studio, con posizione di sorgenti e grotte**

***Fig. 1 Map of the study area, with springs and caves location***

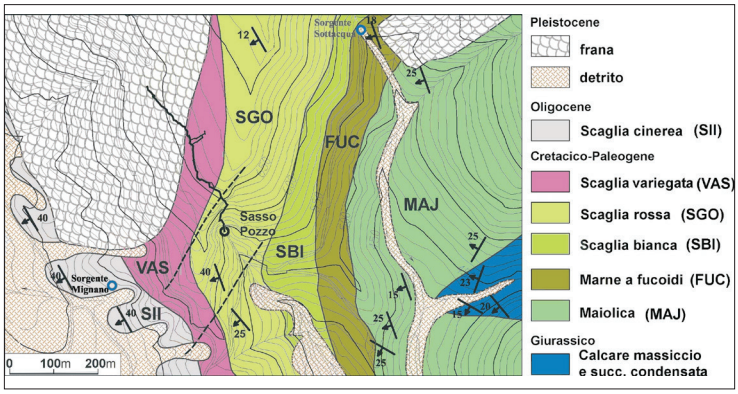



**Fig. 2 Carta geologica dell'area (modificato da Galdenzi et al., 2008)**

***Fig. 2 Geologic map of the study area (after Galdenzi et al., 2008, modified)***

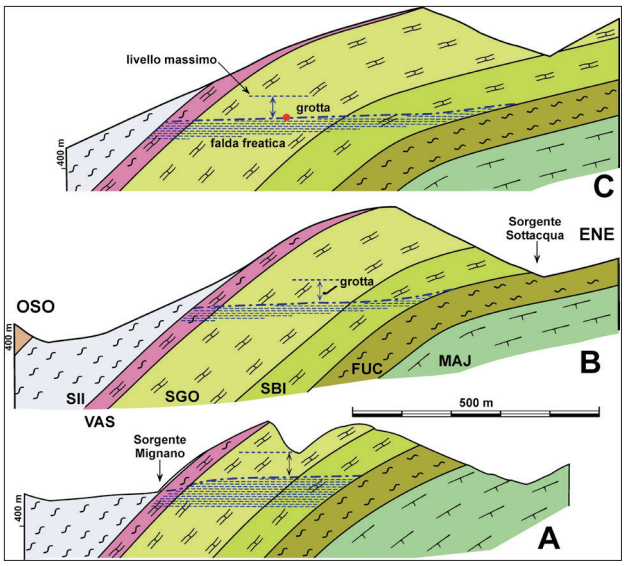



**Fig. 3 Sezioni geologiche**

**(A – ingresso grotta;**
**B – affluente zona centrale;**
**C – lago terminale).**
**Legenda geologica come in Figura 2**

***Fig. 3 Geologic cross sections***

***(A – cave entrance;***
***B – central cave siphons;***
***C – terminal cave lake).***

***Legend: SII – Scaglia cinerea (marl); VAS – Scaglia Variegata (marl); SGO – Scaglia Rossa (limestone and cherty limestone); SBI – Scaglia Bianca (cherty limestone); FUC – Marne a Fucoidi (marl); MAJ – Maiolica (cherty limestone)***

Negli estesi affioramenti calcarei sulle dolci superfici di Monte Lavacelli prevale un assorbimento diffuso attraverso una sottile coltre di terreno vegetale. Due piccoli pozzi (profondità massima di 8 m) documentano l'esistenza di una rete drenante impostata su canali carsici, in analogia a quanto si verifica su altre dorsali. Manifestazioni sorgentizie di piccola entità si aprono a quote elevate rispetto al livello di base locale (Fig. 1), in corrispondenza degli orizzonti poco permeabili compresi nella successione calcarea.

La maggiore grotta (Sasso Pozzo) si trova a 538 m di quota sul fianco della dorsale. Essa è formata da una galleria principale con una lunghezza misurata di 500 metri, con alcune brevi diramazioni, per un totale di circa 600 metri. Nella sua terminazione si raggiunge il livello delle acque freatiche, a -29 rispetto all'ingresso.

## Caratteri idrogeologici

*Aspetti regionali*

Le dorsali montuose dell'Appennino umbro marchigiano sono formate principalmente da terreni calcarei, dove l'esistenza di fenomeni carsici ipogei è ben documentata (Galdenzi, 2004). Piccole grotte assorbenti di andamento verticale, con deflusso idrico fortemente variabile in diretta dipendenza degli apporti meteorici, testimoniano l'esistenza di una rete drenante carsica all'interno dei rilievi montuosi.

Il deflusso negli acquiferi avviene con modalità differenti per le falde di base, che in genere interessano il nucleo delle maggiori strutture antiformi, e per le falde minori, spesso sospese sul livello di base o confinate tra orizzonti poco permeabili sui fianchi delle strutture plicative.

La falda di base risente in maniera generalmente limitata di variazioni stagionali di livello, di portata, e di chimismo, e le acque emergono spesso in forma diffusa lungo gli alvei delle valli che tagliano trasversalmente le strutture anticlinali, dove determinano significativi incrementi di portata (Boni et al., 1986). Il chimismo delle acque di queste falde può essere influenzato dall'interazione con acque di composizione solfato clorurata, che hanno seguito circuiti relativamente profondi (Nanni & Vivalda, 1999).

Le falde minori hanno bacini di alimentazione meno estesi, fino ad alcuni km$^2$, ed emergenze localizzate sui fianchi delle dorsali montuose, a quote maggiori rispetto al livello di base locale. Queste sorgenti hanno portate inferiori ed un regime molto meno regolare, e sono state registrate sensibili variazioni stagionali di portata, chimismo e temperatura (Nanni, 1991). In queste situazioni la giacitura degli acquiclude intercalati alle unità calcaree favorisce drenaggi paralleli all'asse della struttura, ed è frequente lo sviluppo di grotte, spesso con flusso idrico permanente o temporaneo (Galdenzi, 1988, 2004, con bibliografia). Queste grotte hanno breve sviluppo e piccole dimensioni; sono formate da gallerie lineari o poco ramificate, orientate parallelamente all'asse delle strutture plicative, nella direzione dei drenaggi idrici; l'andamento è sub-orizzontale, e sono frequenti tratti in contropendenza.

*L'acquifero di Monte Lavacelli*

All'interno dell'area di studio il più importante acquifero, a scala locale, si trova sul fianco orientale del Monte Lavacelli nel complesso idrogeologico di Scaglia bianca e Scaglia rossa (Fig. 3). Queste unità sono costituite da calcari cretacei e paleogenici, con livelli selciferi nella parte inferiore e superiore. È presente una frazione marnosa, crescente verso la parte superiore.

Il complesso delle Scaglie nell'area ha uno spessore totale di ~ 250 m, ed è permeabile per fessurazione e carsismo. Esso è compreso tra due acquiclude: al letto le Marne a fucoidi sono interposte tra le Scaglie e la sottostante unità permeabile (Calcare maiolica), mentre verso l'alto le unità prevalentemente marnose di età eocenica ed oligocenica (Scaglia variegata e cinerea) chiudono la successione carbonatica (Fig. 3).

L'acquifero drena acque infiltrate principalmente nella Scaglia rossa alla sommità della dorsale, nel M. Lavacelli, ed alimenta due sorgenti principali: la più importante (Sorgente di Mignano, quota 460 m) è una sorgente di sbarramento nella Scaglia cinerea, sul versante occidentale dell'anticlinale, con portate massime di alcuni L/s, mentre la Sorgente Sottacqua (quota 555 m) è al contatto tra Scaglia bianca e Marne a fucoidi nella valle del Fosso dell'Elce (Figg. 2 e 3). Le due sorgenti sono utilizzate per l'approvvigionamento idrico nel vicino Comune di Gagliole (circa 670 abitanti), ma nel periodo tardo estivo ed autunnale la loro portata decresce fortemente, tanto da non soddisfare il fabbisogno idrico del pur piccolo Comune. Ulteriori emergenze idriche si hanno nella forra sotto l'ingresso di Sasso Pozzo (portata inferiore ad 1 L/min) e nei solchi vallivi della Valle di Mignano. La portata di queste ultime emergenze, in particolare, risente fortemente dei maggiori eventi meteorologici.

## La Grotta

*Caratteristiche generali*

Sasso Pozzo è il miglior esempio di emergenza carsica temporanea nella regione marchigiana, ed è stata già oggetto di precedenti ricerche: Bocchini (Bocchini et al., 1980) ne ha discusso la morfologia ed i riempimenti di ghiaie, arrotondate per effetto del trasporto subito all'interno della grotta. Galdenzi (Galdenzi, 1988) l'ha proposta come esempio di risorgente a tubo semplice nell'ambito di uno studio sui fenomeni carsici nelle formazioni di Maiolica e

Scaglia. Una dettagliata descrizione a carattere divulgativo è stata proposta recentemente da Galdenzi (Galdenzi et al., 2008). La formazione della grotta e la sua evoluzione in relazione all'evoluzione morfologica superficiale è discussa in Galdenzi (2012).

La grotta si apre a circa tre metri da terra in un costone roccioso, lungo una piccola frattura. Dal suo imbocco, in occasione di periodi piovosi prolungati, sgorga una cascata d'acqua che si rovescia nella valle sottostante (Fig. 4), dove origina una piccola forra. La grotta si sviluppa interamente nella parte intermedia, non selcifera della Scaglia rossa, ad una profondità di 110-135 m rispetto alla superficie topografica, al di sotto di coperture (Scaglia variegata) poco permeabili (Figg. 2 e 3). Al termine della grotta, alla base di un pozzo si raggiunge il livello della falda idrica, a circa 350 m di distanza e a -29 m di profondità rispetto all'ingresso. La grotta ha una struttura lineare, poco ramificata; la galleria principale segue l'orizzonte carsificato, parallelamente alla direzione degli strati, con una sezione compresa tra 1 e 2 m.

La sezione longitudinale della grotta ha un andamento irregolare, con numerosi tratti in contropendenza. La zona più elevata è a +9 m sopra l'ingresso, mentre nelle zone più profonde si scende fino a -29 m di profondità; il dislivello totale è quindi 38 m (Fig. 5). La sezione è ellittica, con tipiche morfologie freatiche e pareti interamente coperte da scallop. I riempimenti fisici sono scarsi; piccoli depositi di ghiaie sub-arrotondate derivate dalle stesse unità calcaree in cui si apre la grotta stanno alla base dei tratti ascendenti delle gallerie.

*Morfologia*

Nella grotta in base alle condizioni idrologiche possono essere distinti 4 settori, che differiscono anche per la tipologia di forme e depositi.

Zona iniziale – In questa zona prevale l'azione incrostante delle acque di stillicidio sopra le pre-esistenti forme parietali corrosive. Poco oltre l'ingresso c'è il sifone iniziale, asciutto per larga parte dell'anno, che tuttavia può riempirsi rapidamente. Nella parte più elevata ci sono residui depositi di guano, incrostati e ricorrosi, testimoni di un precedente momento evolutivo in cui la grotta ospitava colonie di pipistrelli.

Zona del sifone superiore – Inizia nella parte più alta della grotta, dove ancora prevale il concrezionamento, e dà accesso al lungo tratto discendente che conduce ai sifoni

**Fig. 4 L'ingresso della grotta in occasione di una piena**

***Fig. 4 The cave entrance during a flooding event***

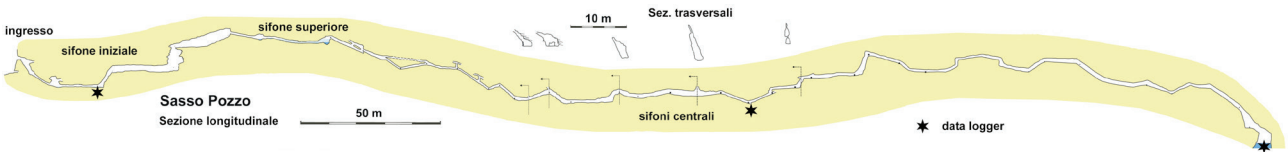



**Fig. 5 Sezione longitudinale grotta, con ubicazione stazioni di misura. Rilievi di campagna: Andrea Bocchini, Antonio Fontana, Gilberto Stefanini (G.S. CAI Jesi, 1979-1981) – Alfredo Campagnoli e Sandro Galdenzi (2008-2009)**

***Fig. 5 Cave section, with location of the data loggers used for water monitoring. Field survey: Andrea Bocchini, Antonio Fontana, Gilberto Stefanini (G.S. CAI Jesi, 1979-1981) – Alfredo Campagnoli, Sandro Galdenzi (2008-2009)***

centrali. Questo sifone rappresenta la vera porta di ingresso alle zone interne. Trovato chiuso dai primi esploratori, è stato poi superato da quattro ragazzi di Gagliole che hanno così raggiunto il fondo della grotta. Non è stato monitorato, in quanto nelle nostre visite si era sempre presentato aperto, con pochi decimetri d'acqua in due pozze, a causa del lungo periodo di siccità. Gli appunti raccolti da Bocchini all'inizio degli anni '80 testimoniano invece che assai spesso risultava chiuso, per un tratto di oltre 15 metri, anche durante il mese di giugno e a fine agosto. Anche nel giugno 2009 è risultato chiuso.

Sifoni centrali – La zona centrale ha andamento sub-orizzontale, con numerosi tratti sifonanti disposti a quota simile. Le pareti sono spesso rivestite da depositi fini, prodotti per decantazione da corpi d'acqua stagnanti. Nel tratto più depresso un piccolo cunicolo rappresenta la via di deflusso delle acque. Qui si immette anche l'unico importante ramo laterale, uno stretto cunicolo d'interstrato, ascendente, da cui possono arrivare rapidi afflussi di acque vadose.

Zona terminale – La parte finale risente di un'attiva azione erosiva e corrosiva delle acque. Le pareti sono pulite, levigate, con scallop, piccole marmitte, scannellature e solchi meandriformi creati dall'azione corrosiva dell'acqua. Mancano totalmente depositi chimici e sono scarsi i depositi fisici, formati solo da ghiaie. Sono comuni contropendenze, per dislivelli di alcuni metri, e una lunga discesa porta al lago terminale, permanente, di livello variabile.

*Speleogenesi*

La morfologia in grande ed in dettaglio indica che la formazione della galleria è avvenuta in condizioni freatiche. Il flusso idrico nell'acquifero coinvolgeva un elevato spessore (oltre 40 m) di un ammasso roccioso con permeabilità non uniforme, dove un elevato gradiente idraulico consentiva la formazione di gallerie ad andamento irregolare con tratti in contropendenza.

Queste condizioni speleogenetiche si verificarono quando il livello locale di base era a quota 550 m o superiore, prima che le coperture marnose fossero smantellate fino alle quote attuali. In seguito all'approfondimento della rete idrografica di fondovalle avvenuto nel corso del Pleistocene medio, l'arretramento della testata nella Valle di Mignano ha eroso le unità marnose fino alla Scaglia cinerea (Fig. 3) determinando l'abbassamento dei livelli piezometrici e la formazione di nuove emergenze a quote più basse sul fianco della piega (Galdenzi, 2012).

Dopo questo evento la grotta è entrata nella presente fase evolutiva, e l'attività idrica è diventata temporanea, direttamente dipendente dall'andamento meteorologico.

*Idrologia*

L'attività idrologica della grotta è stata ricostruita in base ai dati idrometrici registrati, ad osservazioni dirette e annotazioni storiche. Le stazioni di monitoraggio sono state scelte dopo appositi sopralluoghi effettuati nel biennio 2006 – 2007, piuttosto siccitoso per l'Appennino Marchigiano. In questo periodo la grotta era molto asciutta e interamente percorribile al momento delle visite. Nella grotta è stato posizionato un data logger per il monitoraggio di conducibilità, livello idrico e temperatura nel lago-sifone terminale; due logger per livello idrico e temperatura sono stati lasciati nel punto più depresso del settore centrale e nel sifone iniziale (Fig. 5). Un ulteriore logger (conducibilità, livello idrico e temperatura) è stato posizionato presso la Sorgente Mignano. Nel periodo di monitoraggio (ottobre 2007 – ottobre 2008), l'autunno è risultato siccitoso, e solo in primavera si sono avute abbondanti precipitazioni.

*Caratteristiche delle acque di falda*

Lo studio della falda idrica può avvalersi del confronto tra i dati acquisiti presso la sorgente e nel lago terminale della grotta. Anche se i sensori erano ubicati a distanza di circa 500 m, i valori di conducibilità e temperatura acquisiti sono molto simili ed hanno subito solo piccole variazioni durante il periodo di osservazione, con valori medi di 341 µS/cm e 11,4 °C per la sorgente di Mignano e 329 µS/cm e 10,9 °C nel lago terminale della grotta (Fig. 6). Le variazioni di conducibilità seguono un trend simile nelle due località. In occasione di importanti eventi meteorici si registrano rapidi incrementi dei valori, che si riequilibrano entro 2 settimane, più rapidamente nella grotta che alla sorgente. Da osservare che dopo l'evento del 6-7 marzo (oltre 90 mm in 24 ore) nel lago interno è stato registrato un iniziale abbassamento dei valori di conducibilità, da imputare ad un diretto arrivo di acque superficiali.

Le variazioni termiche stagionali sono inferiori a 1°C in entrambe le postazioni, ma la sorgente di Mignano risente maggiormente dei cicli termini stagionali. Nel lago interno gli apporti meteorici superficiali sono chiaramente registrati da variazioni termiche negative, mentre alla sorgente gli stessi eventi, pur producendo variazioni di livello, non causano generalmente effetti termici di pari entità. Da osservare come le prime piogge importanti del 30-31 ottobre 2007, che pongono fine alle condizioni estive, causano effetti termici opposti, con innalzamento di temperatura alla sorgente e brusco abbassamento nel lago interno (Fig. 6).

*Livelli piezometrici*

Il livello assoluto delle acque sotterranee è più elevato nella grotta che nelle emergenze superficiali. In condizioni normali le acque del lago terminale sono a quota 509 m, mentre la sorgente di Mignano è a circa 461 m e la piccola emergenza nella forra di Sasso Pozzo a circa 490 m. La sorgente Sottacqua, si trova invece a quota maggiore (circa 555 m), lungo il contatto basale tra i calcari della Scaglia con le Marne a fucoidi, nella parte alta della Valle

dell'Elce (Figg. 2 e 3B) e non può rappresentare un punto di deflusso per le acque della grotta.

L'alto gradiente idraulico denota una bassa permeabilità nella zona satura dell'acquifero, confermata anche dalla posizione delle sorgenti (Mignano ed emergenze minori), ubicate a quote elevate rispetto alla soglia di permeabilità di letto (Marne a fucoidi), incisa fino a quote inferiori a valle della grotta (Fig. 2).

Importanti variazioni dei livelli idrici sono state registrate durante il periodo di osservazione, sia nelle acque della falda idrica, sia nei sifoni sospesi all'interno della grotta; tutte le variazioni sono direttamente correlabili agli apporti piovosi (Fig. 7). L'ampiezza delle oscillazioni varia fortemente, mantenendosi al di sotto di 1 m nella vasca di decantazione nel principale bottino di presa della sorgente Mignano. Nel lago interno si sono riscontrati incrementi di livello di circa 2 m con picchi del livello piezometrico fino a oltre 45 m sul livello normale (Fig. 7), in occasione dei quali si è verificata anche la riattivazione dell'emergenza temporanea di Sasso Pozzo (Fig. 4).

## Risposta agli eventi meteorici

I dati idrometrici evidenziano una risposta molto rapida agli eventi meteorici, sia nella sorgente che nel lago terminale (Fig. 7), con tempistica simile. Gli eventi più significativi sono quelli del 2 aprile 2008 e del 22 aprile 2008, in quanto si sono avute precipitazioni relativamente intense (5-10 mm/h) in un breve di lasso di tempo (Fig. 8).

In entrambi i casi variazioni di livello nel lago terminale sono state registrate con poco ritardo dalle piogge (rispettivamente 7 e 9 ore), mentre il livello massimo delle acque è stato raggiunto 21 e 25 ore dopo le precipitazioni. Le risposte presso la sorgente di Mignano risultano leggermente meno rapide, oltre che di minor ampiezza.

## Attività idrica della grotta

La grotta si apre ben al di sopra del livello normale delle acque, e l'attività idrica si è rivelata fortemente discontinua e dovuta sia al flusso discendente delle acque vadose, sia alla risalita delle acque freatiche.

I flussi vadosi intercettano in diversi punti le vecchie gallerie, obliterando in parte le morfologie freatiche e causando ristagni di acque nei sifoni sospesi.

In occasione dei principali eventi meteorici la risalita del livello delle acque di fondo ha causato la completa riattivazione della grotta. Nonostante la lunga siccità autunnale ed invernale, l'acqua per ben undici volte è risalita dal fondo, arrivando a tracimare dalla bocca in tre occasioni (Fig. 7).

*Le piene*

La documentazione delle modalità con cui avviene la completa riattivazione della grotta in occasione di importanti eventi meteorologici è stato il più interessante risultato delle attività di monitoraggio.

La piena più importante si è verificata il 7 marzo, quando il livello piezometrico è salito fino a + 45,5 nel sifone ter-

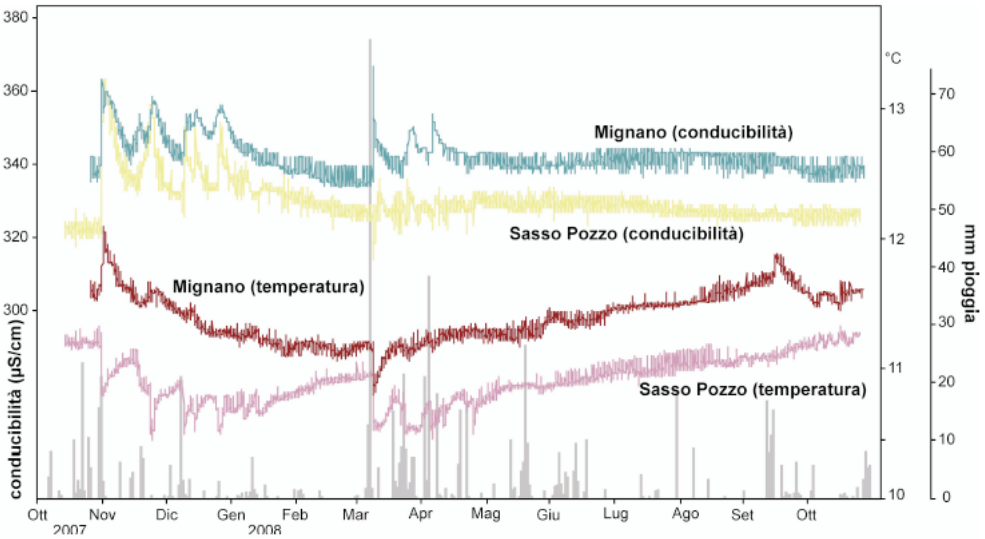



**Fig. 6 Variazioni annuali di conducibilità e temperatura nella Sorgente Mignano e nel lago terminale della grotta Sasso Pozzo, in relazione agli eventi meteorici**

***Fig 6 Conductivity and temperature of the ground-water in the cave and in the Mignano Spring, related to rain during the monitoring period***

minale rispetto ai livelli minimi, mentre nei sifoni sospesi sono stati rilevati carichi idrostatici fino a +28 m nei sifoni centrali e +11 in quello iniziale (Fig. 8). Le quote assolute massime raggiunte dal livello piezometrico sono rispettivamente 555, 550,5 e 539,5 m, con valori decrescenti verso l'ingresso della grotta. In occasione di questo evento, il sifone iniziale si era parzialmente colmato mentre i livelli piezometrici all'interno della grotta erano ancora bassi. In queste condizioni si aveva un debole deflusso idrico solo nelle fessure sottostanti l'ingresso. La tracimazione delle acque dalla bocca è avvenuta più tardi, dopo l'ulteriore aumento dei livelli piezometrici interni (Fig. 9).

In occasione dei principali eventi di piena la risalita dell'acqua è pressoché simultanea in tutti i siti analizzati, anche se nel lago terminale inizia generalmente prima che nei sifoni sospesi (Fig. 10). La velocità di risalita delle acque è veramente elevata, fino a più di un metro di risalita ogni 5 minuti (16 m/h). Al termine della piena, l'abbassamento del livello idrico è altrettanto rapido, anche se l'acqua può ristagnare più a lungo nei sifoni sospesi, in particolare in quelli iniziali.

*I sifoni sospesi*

La totale riattivazione della grotta è dovuta alla generale risalita del livello piezometrico, mentre il comportamento dei sifoni sospesi è più complesso e risente anche di apporti diretti di acque vadose.

Nei sifoni centrali il logger è stato ubicato nel punto più depresso, presso un piccolo cunicolo che assicura il deflusso delle acque verso il basso. Per lunghi periodi si sono registrati livelli idrici con altezze di pochi decimetri, verosimilmente dovuti al ristagno o al lento deflusso di acque vadose. La risalita dei livelli piezometrici è avvenuta solo in occasione dei principali eventi ed è correlata in maniera complessa alle variazioni di livello del lago terminale, come mostrato in Fig. 11, che mette in relazione la differenza tra i livelli piezometrici di lago terminale e sifoni centrali con il livello piezometrico misurato nel lago terminale.

Nei sifoni centrali in occasione delle piene non si registrano significativi aumenti di livello fintantoché la risalita dell'acqua nel lago terminale non supera i 20 m. Fino a questa soglia la differenza nei livelli piezometrici misurati cresce infatti regolarmente (sequenza A di Fig. 11), in dipendenza del livello nel lago terminale, mentre il sifone centrale è asciutto o c'è un livello costante di pochi decimetri. Superata la soglia dei 20 m, i livelli piezometrici divengono interdipendenti, con differenza che si mantiene costante, tra 6 e 8 m (B); in questa fase i sifoni centrali sono invasi completamente, poiché le acque non riescono più a defluire verso il basso o addirittura risalgono dalle zone sature sottostanti. Solo quando il livello piezometrico del lago terminale supera la quota di +32 m (C), l'acqua supera la soglia superiore a monte del sifone (Fig. 9) e trabocca direttamente verso i sifoni centrali. A questo

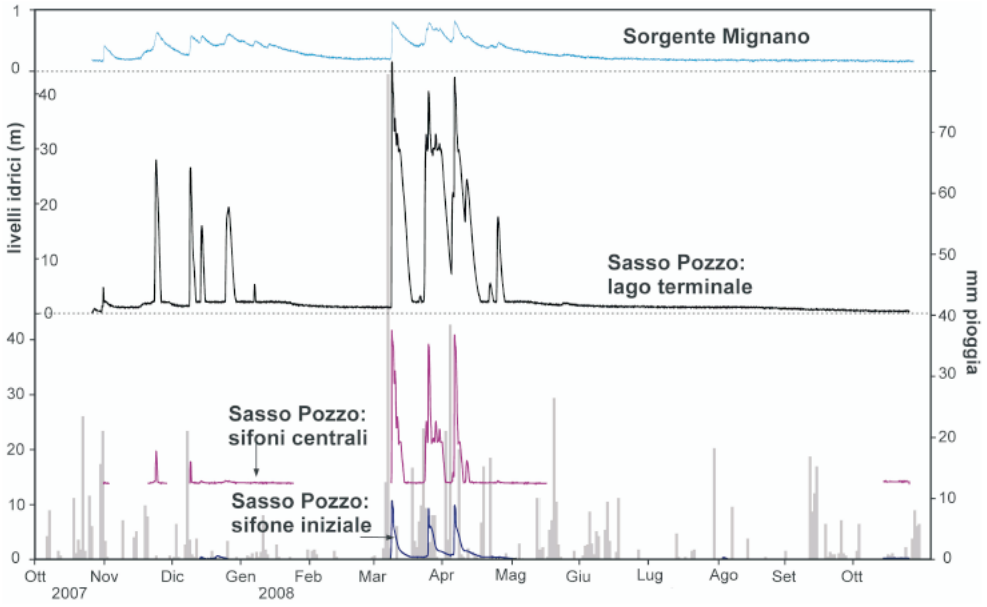



**Fig. 7 Variazioni relative dei livelli piezometrici alla Sorgente Mignano e nella Grotta Sasso Pozzo, in relazione agli eventi meteorici. Il livello di riferimento per i sifoni centrali è la quota minima del lago terminale**

***Fig. 7 Changes of the piezometric level in the cave and in the Mignano Spring related to rain. The reference for the central siphon values is the minimum level of the terminal lake***

punto c'è continuità idraulica nelle gallerie della grotta, e le differenze tra i livelli piezometrici si riducono a pochissimi metri (sequenza D di Fig.11). Nel periodo monitorato, il superamento della quota +32 ha prodotto la riattivazione completa della grotta con deflusso fino all'esterno.

Il riempimento dei sifoni più esterni può essere causato anche dai soli apporti di acque vadose come già descritto nei momenti iniziali della piena del 7 marzo (fig. 9). Il diretto afflusso di acqua di infiltrazione dall'alto è stato verificato anche in occasione dei temporali estivi che causano la risalita del livello nei sifoni più esterni senza produrre effetti rilevabili sulle acque di fondo (Fig. 12). Questi sifoni esterni, a differenza dei sifoni centrali, non hanno rapide vie di svuotamento e possono rimanere chiusi anche per tempi lunghi dopo gli eventi piovosi. Il sifone superiore, in particolare, rappresenta la vera porta d'accesso alla grotta.

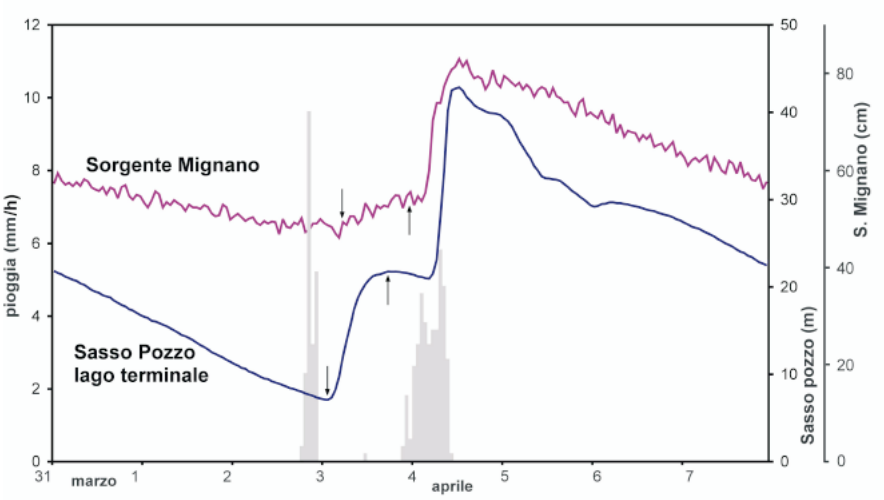



**Fig. 8 Risposta della Sorgente Mignano e del lago terminale della grotta Sasso Pozzo a due piogge intense e di breve durata. Le frecce indicano i primi arrivi delle acque di infiltrazione ed il livello massimo raggiunto dalle acque**

***Fig. 8 Level changes in the Mignano Spring and in the terminal lake of Sasso Pozzo cave after strong rains. The arrows indicate the first arrival of infiltration water and the maximum water level***

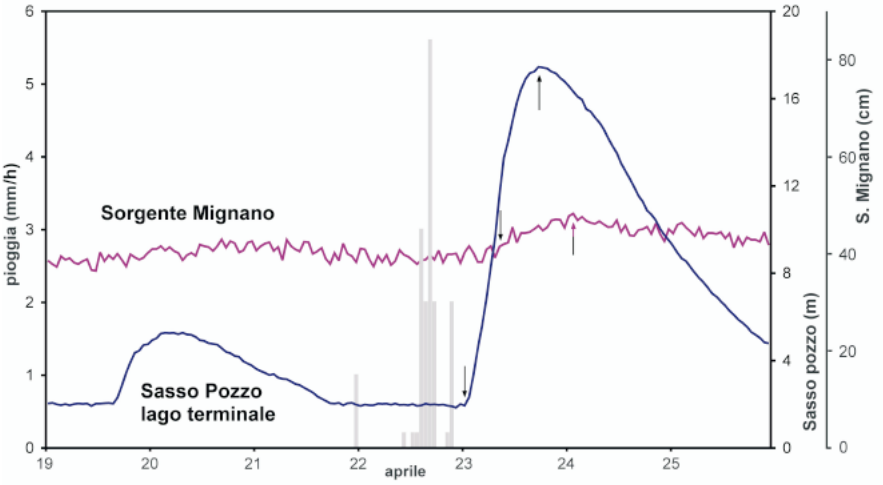
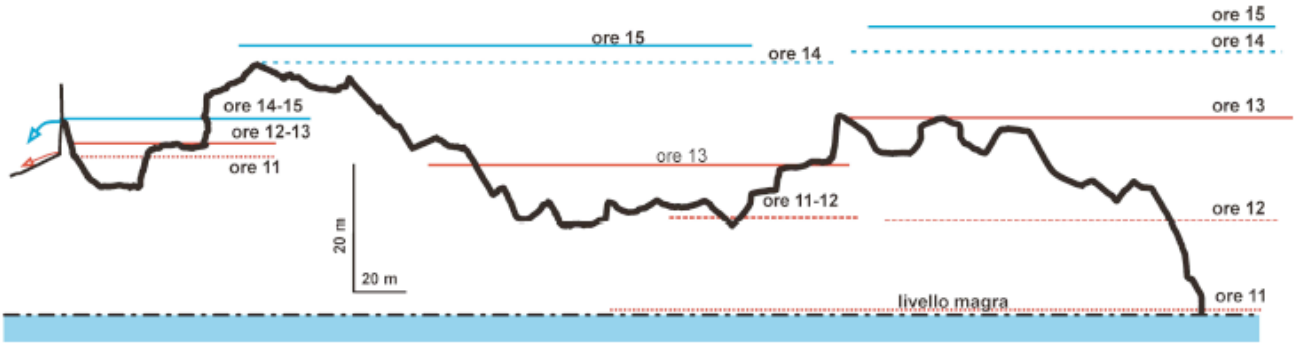



**Fig. 9 Variazioni orarie dei livelli piezometrici nelle varie parti della grotta nella piena del 7 marzo 2008**

***Fig. 9 Hourly changes of the piezometric level in the different parts of the cave during a flooding event (March 7, 2008)***



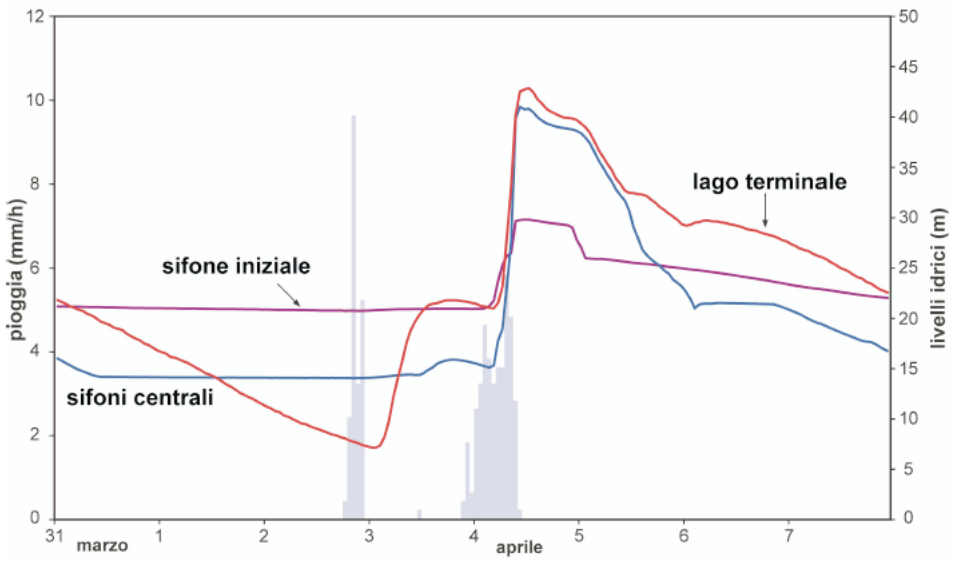



**Fig. 10 Livelli piezometrici misurati in occasione della piena del 4 aprile. Le quote sono riferite al livello di magra del lago terminale**

***Fig. 10 The piezometric levels measured during the flood of April 4. The reference for all the values is the minimum level of the terminal lake***

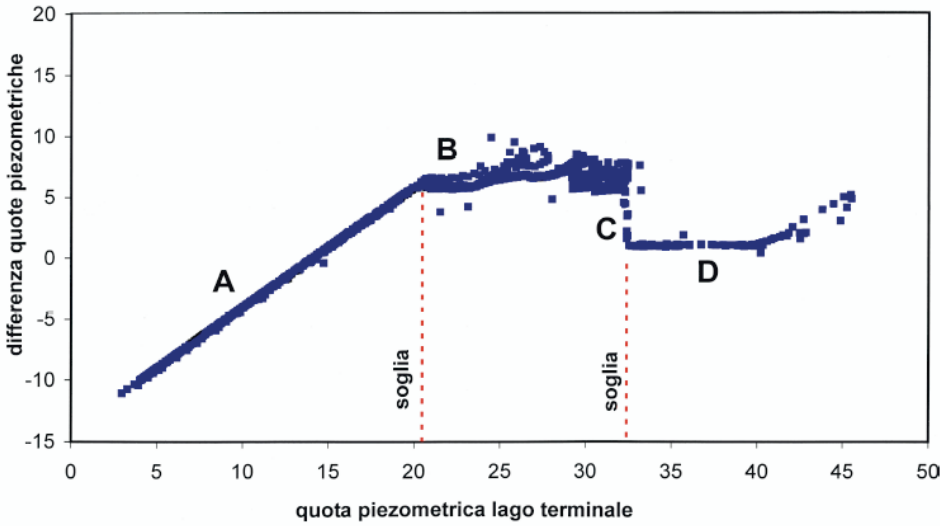



**Fig. 11 Livelli piezometrici misurati in occasione della piena del 4 aprile. Le quote sono riferite al livello di magra del lago terminale**

***Fig. 11 The piezometric levels measured during the flood of April 4. The reference for all the values is the minimum level of the terminal lake***

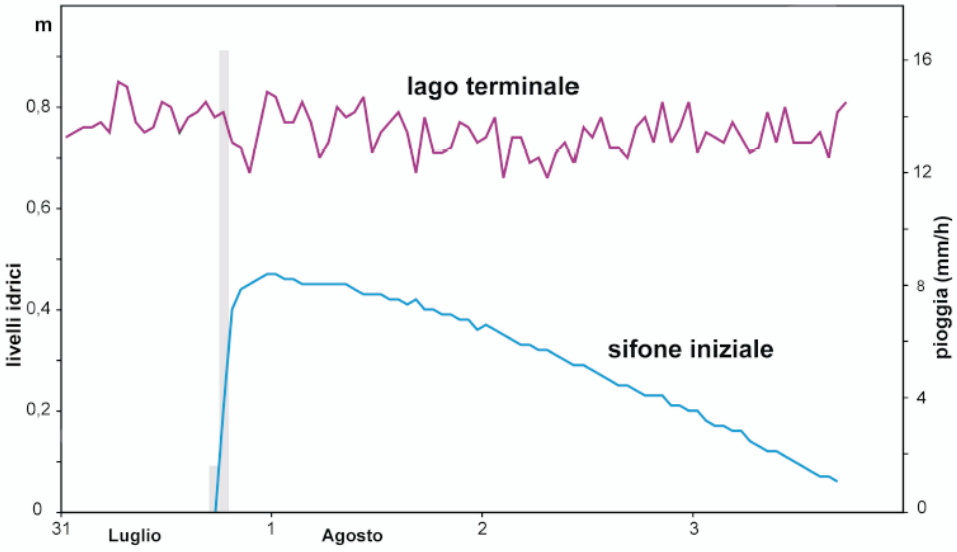



**Fig. 12 Livelli piezometrici relativi misurati in occasione del temporale del 31 luglio 2008**

***Fig. 12 Changes of the piezometric levels after the storm of July 31, 2008***

## Discussione

La struttura morfologica della grotta ed i dati relativi all'attività idrologica forniscono utili indicazioni per la comprensione delle modalità di drenaggio nell'acquifero e sul ruolo svolto al suo interno dalle gallerie carsiche.

L'attività idrica della grotta risente fortemente delle variazioni del livello piezometrico. Anche se apporti diretti di acque d'infiltrazione alimentano i sifoni sospesi, causandone il riempimento, una generalizzata invasione delle gallerie da parte delle acque si ha solo in risposta di importanti variazioni di livello piezometrico del lago terminale, da cui le acque risalgono fino eventualmente a traboccare dall'ingresso. La grotta va pertanto considerata parte integrante di un circuito idrico che normalmente coinvolge le zone più profonde dell'acquifero, ma in occasione di importanti eventi meteorici interessa per brevi periodi anche gallerie carsiche normalmente asciutte.

L'alimentazione dell'acquifero è assicurata da una rete drenante che permette un rapido arrivo delle acque fino alla zona satura da zone di assorbimento ubicate nella cresta e sui fianchi della piega. Alcuni pozzi che si aprono nelle zone di assorbimento mostrano che nella zona di trasferimento vadoso esiste una rete drenante carsica impostata su vie di andamento verticale. La ricarica dell'acquifero, anche in base alle osservazioni effettuate nella grotta, è però dovuta maggiormente a flussi idrici che seguono l'andamento complessivo della stratificazione, in canali di piccole dimensioni, generalmente non accessibili, ma capaci comunque di assicurare una rapida discesa delle acque fino alla falda idrica.

Le acque di infiltrazione nella loro discesa finiscono con il raccogliersi sul fianco della piega all'interno dell'unità calcarea permeabile, confinata lateralmente da orizzonti marnosi. Nella zona satura i flussi idrici si concentrano in direzione parallela all'asse della struttura, con emergenze localizzate dove le incisioni vallive trasversali abbassano le soglie di permeabilità. Questo assetto strutturale, comune nei versanti montuosi della regione marchigiana, è favorevole allo sviluppo di gallerie carsiche nella zona freatica (Galdenzi, 1988).

La struttura morfologica in grande ed in dettaglio della grotta fa ritenere che essa si sia formata nella zona satura a causa di flussi che coinvolgevano un elevato spessore dell'ammasso roccioso, fino ad oltre 40 m al di sotto dell'originaria superficie freatica. L'approfondimento dell'idrografia nel corso del Pleistocene medio ha causato un progressivo abbassamento del livello delle acque sotterranee, che rimane tuttavia sospeso di oltre 200 m rispetto al locale livello di base rappresentato dal Fiume Potenza.

In questo diverso contesto geomorfologico la grotta ha modificato le sue funzioni idrologiche, comportandosi da emergenza di troppo pieno. Il deflusso delle acque freatiche si è spostato in una zona più profonda dell'acquifero, dove l'elevato gradiente idraulico tra le acque di fondo nella grotta e la sorgente principale suggerisce che la permeabilità per fessurazione e carsismo sia attualmente inferiore rispetto alla zona vadosa. I maggiori eventi meteorici causano pertanto rapidi apporti di acque verso la falda, dove non sono né immagazzinati, né smaltiti dalle normali vie drenanti, producendo perciò rapide ed importanti risalite del livello piezometrico, fino ad oltre 40 m, che determinano la completa riattivazione della grotta.

Per quanto ogni sistema carsico vada considerato nelle sue peculiarità, in relazione alle situazioni locali che ne hanno consentito lo sviluppo, le considerazioni relative alle modalità di sviluppo del carsismo ed alla sua influenza sui drenaggi sotterranei nel caso di Sasso Pozzo sono un buon modello per altri acquiferi di simile tipologia, comuni sui fianchi delle dorsali montuose e spesso associati a piccole grotte che fungono da emergenze attive o temporanee, in genere difficilmente accessibili all'esplorazione diretta.

***Ringraziamenti***

*Il presente lavoro è stato svolto grazie alla collaborazione di Eugenio Pistolesi, Flavio Baldoni, Giulio e Federica Cotechini, Marco Bani, Roberto Bambini, Giampaolo Bellesi, Antonello Compagnucci, che si sono alternati nel supporto alle operazioni di rilievo ed alle attività connesse con il monitoraggio. Un ringraziamento va anche a Flavio Calvani e Andrea Bocchini†, per le utili informazioni sulle loro esplorazioni e ricerche sulla grotta. Il monitoraggio delle acque e le operazioni di livellazione sono state effettuate nell'ambito del progetto "La circolazione idrica sotterranea nella grotta Sasso Pozzo di Gagliole", finanziato dalla Regione Marche (L.R. 12/2000). I dati pluviometrici sono stati messi a disposizione dalla Multiservizi Spa di Ancona, grazie alla disponibilità del Geom. Giuliano Bartolini e dell'Ing. Alessandro Bregagna. Il Comune di Gagliole ha collaborato, rendendo possibile l'istallazione degli strumenti presso la sorgente Mignano. Un ringraziamento va anche a Paolo Paoletti, appassionato conoscitore degli aspetti naturalistici del territorio di Gagliole, che ha agevolato tutte le iniziative volte ad incrementare le conoscenze sulla grotta.*

## Bibliografia

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 Speleologia, 18-24. Treviso.

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

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

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

GALDENZI S., 2012 – *La grotta Sasso Pozzo (Gagliole, Marche): attività idrologica ed evoluzione speleogenetica*, Sottomesso a: Alpine and Mediterranean Quaternary.

GALDENZI S., MENICHETTI M., 1995 – *Occurrence of hypogenic caves in a karst region: examples from Central Italy*, Environmental Geology, 26: 39 47.

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

NANNI T., 1991 – *Caratteri idrogeologici delle Marche*, In: AA.VV, L'ambiente Fisico delle Marche, 115- 209. Officine Grafiche Tecnoprint, Bologna.

NANNI T., VIVALDA P., 1999 – *Le acque sulfuree della regione marchigiana*, Bollettino Società Geologica Italiana, 118: 585-599.