

APPLICAZIONI DI METODOLOGIE DI IMMERSIONE SCIENTIFICA E ROV (REMOTE, OPERATED, VEHICLE) NELLO STUDIO GEOLOGICO COMPARATO DEI DUE SINKHOLES ALLAGATI PIÙ PROFONDI DEL PIANETA: POZZO DEL MERRO (LAZIO, ITALIA CENTRALE), EL ZACATON (TAMAULIPAS, MESSICO).

CARAMANNA GIORGIO*, **GARY MARCUS****

*APAT – INGV Roma,

**University of Texas at Austin – USGS Austin

INTRODUZIONE

Allo stato attuale delle conoscenze le voragini carsiche a cielo aperto allagate (phreatic sinkholes) di maggior dimensione del pianeta sono il Pozzo del Merro (392 m) in Italia ed El Zacaton (>330 m) in Messico. La presenza di acqua ha reso necessario lo sviluppo di sistemi particolari per il loro studio. Sono state impiegate metodologie di immersione scientifica per il campionamento di acqua e roccia, per misure morfometriche, e per la documentazione video-fotografica degli ambienti sommersi. Si sono anche usati dei sistemi robotizzati in grado di raggiungere le profondità più elevate di difficile, od impossibile, accesso per i ricercatori subacquei.

Da un punto di vista geologico le aree in cui si aprono le voragini mostrano notevoli similitudini: si è in presenza di affioramenti di rocce carbonatiche compatte in prossimità di strutture vulcaniche con un reticolo carsico ipogeo ben sviluppato e con lineamenti tettonici ben definiti. Anche l'idrogeologia è simile con vaste aree di infiltrazione e con la falda carsica basale interessata da apporti di fluidi profondi mineralizzati.

In entrambe le situazioni attorno ai sinkholes principali si localizzano altre voragini più piccole, a luoghi interessate da massicce risalite di fluidi geotermici e mineralizzati e deposizione di travertini, che si allineano secondo direzioni ben correlabili con lineamenti tettonici di importanza locale e regionale.

1. GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA ED IDROGEOLOGIA DELLE CAVITÀ

1.1. Il Pozzo del Merro e le Acque Albule

I Monti Cornicolani rappresentano la propaggine più occidentale del settore appenninico laziale poco a Nord di Tivoli. Sono costituiti da tre rilievi principali: "Monte S. Francesco" (206 m) con orientazione NNW-SSE, Sant'Angelo Romano (400 m) orientato anch'esso NNW-SSE e Poggio Cesi (413 m) allineato circa N-S.

I tre rilievi sono costituiti prevalentemente da calcari del Lias inferiore e, in minor misura, da analoghi sedimenti del Lias medio-Cretacico medio. I sedimenti carbonatici che, nella successione stratigrafica, seguono il "Calcere Massiccio" di tipo "A" di Monte Nerone di "paleopiattaforma" epicontinentale (CHIOCCHINI & MANCINELLI, 1978), hanno potenze modeste e si sono depositi da Est ad Ovest in tempi sempre più recenti con un arresto durante il Cenomaniano inferiore (SEGRE, 1948; CHIOCCHINI et alii, 1979). Ai termini calcarei si associano, al margine settentrionale, sedimenti Pliocenici clastici etero-

geni (sabbie, limi, argille) mentre i versanti sud occidentali sono interessati da coperture di tufi basaltici e leucitici (Fig. 1). La zona viene considerata come l'affioramento dell'estremo settore meridionale della "Dorsale Tiberina" (CHIOCCHINI et alii, 1979). Il Fosso delle Dame, il cui corso di impostazione pliocenica è notevolmente spostato ad O-vest, separa la struttura cornicolana dai vicini Monti Lucretili (MAXIA, 1962).

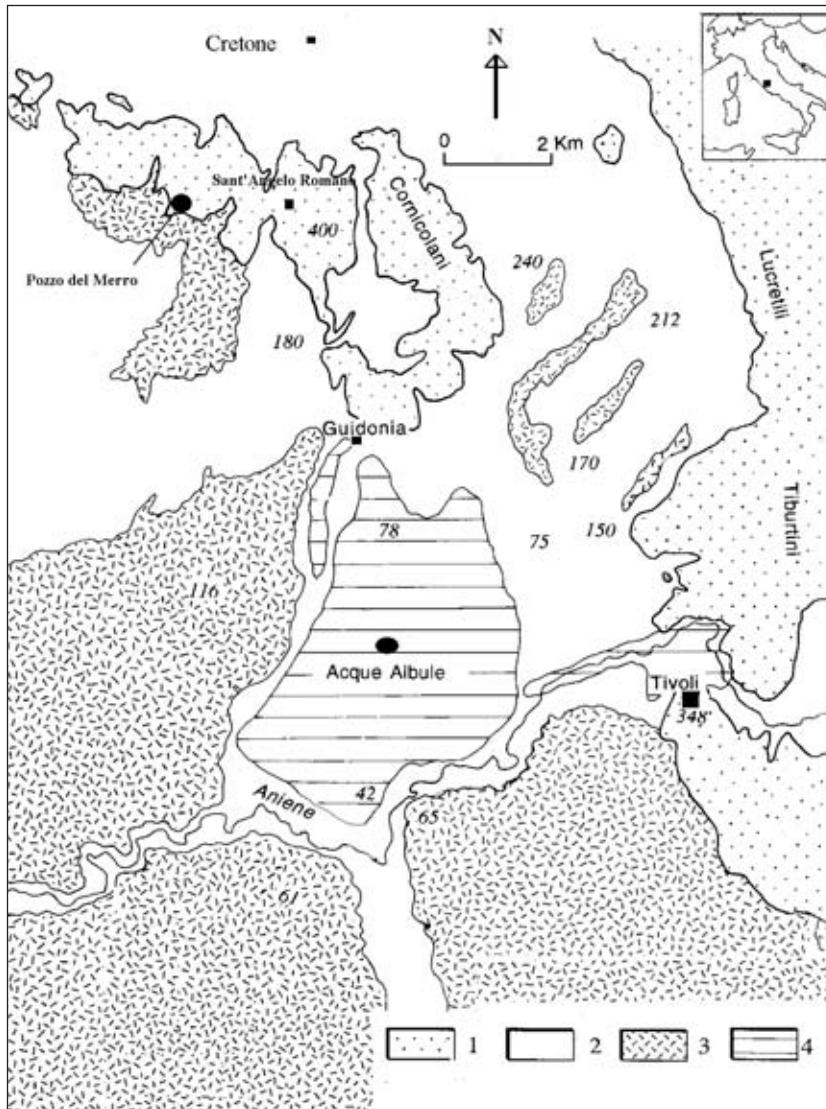


Fig. 1 - Schema geologico del sistema Merro – Albule (da Facenna et alii, 1994 mod.) 1) Calcarei 2) Copertura 3) Vulcaniti 4) Travertini

L'area è caratterizzata da motivi tettonici di estensione sia locale che regionale con la presenza di tre sistemi di faglie subverticali con direzione NW-SE, NE-SW, N-S associati a quattro fasi deformative principali legate sia a tettonica compressiva che distensiva (MATTEI et alii, 1986).

Il substrato carbonatico è interessato da vistosi fenomeni carsici con formazione di cavità epigee ed ipogee. In alcuni casi le voragini si sono manifestate in modo repentino senza apparenti segnali premonitori. Ad un tale fenomeno di crollo improvviso si deve la formazione della dolina di Quarto Pianelle a nord di Montecelio (CREMA, 1915). Frequenti sono le segnalazioni di boati uditi dalla popolazione locale cui spesso fanno seguito ritrovamenti di nuove aperture sul piano campagna che consentono di raggiungere cavità ipogee (Ezio Curti G.S.G. com. pers.). A sud dell'area cornicolana si estende il Bacino delle Acque Albule con gli imponenti depositi di travertino. Di origine tettonico-carsica il bacino raggiunge l'assetto odierno durante l'ultima fase di sollevamento del Preappennino Romano. Il carsismo è diffuso con estesi fenomeni di sgrottamento e formazione di doline di crollo la cui morfologia risulta spesso obliterata da interventi antropici. Un sollevamento in blocco della struttura ha interrotto la deposizione del travertino e il conseguente approfondimento del reticolo idrografico ha fatto sì che le acque calcareo-solfidriche risalenti dal sottosuolo esercitino la loro azione incrostante prevalentemente in ambiente ipogeo contrastando la formazione delle citate cavità nel substrato travertinoso (MAXIA, 1949).

Il sinkhole del Pozzo del Merro si trova entro i limiti del Parco Naturale di Macchia di Gattaceca e Macchia del Barco, a quota 130 m, nei Monti Cornicolani presso il Comune di Sant'Angelo Romano. Sul fondo è presente un piccolo specchio lacustre che cela una delle voragini carsiche allagate più profonde del pianeta.

La morfologia della voragine è caratterizzata da una forma ad imbuto con il diametro che si restringe progressivamente dai 150 metri del piano campagna ai 25 della superficie lacustre che si trova circa 70 metri al di sotto del piano campagna. Il settore sommerso è costituito da un vero e proprio condotto carsico dall'andamento irregolare caratterizzato da numerose aperture laterali che formano un reticolo di canali secondari, a tratti percorribili dai subacquei. Lungo le pareti sono evidenti i segni di un elevato tasso di erosione carsica. Il fondo della voragine è ricoperto da uno spesso deposito di limo argilloso rosso, residuo della dissoluzione del calcare (Fig. 2-7).

La falda affiorante è quella regionale dell'idrostruttura dei Monti Cornicolani con una caratterizzazione bicarbonato-calcica con modesti apporti di solfuri da parte di fluidi di origine profonda probabilmente collegati all'attività del vicino Vulcano Albano. La temperatura è costante tutto l'anno lungo la colonna d'acqua con valori attorno ai 15-16°C. Le caratteristiche morfologiche ed idrochimiche lasciano ipotizzare di essere in presenza di un fenomeno di ipercarsismo geotermico molto spinto. La genesi del sinkhole è riconducibile alla dissoluzione inversa (dal basso verso l'alto) del calcare massiccio ad opera di fluidi aggressivi risalenti attraverso vie preferenziali rappresentate da faglie di estensione sia locale che regionale.

Pochi chilometri più a sud si trovano tre sinkholes aperti nella lente di travertino che caratterizza la piana di Tivoli. Due di questi, Lago Regina e Lago Colonnelle, sono le sorgenti delle Acque Albule. Il Lago Regina (prof. massima 35 m) ha il diametro maggiore ed un fondo piatto. Le pareti di travertino sono interessate da numerosi fratture attraverso le quali vi è sia un flusso in ingres-

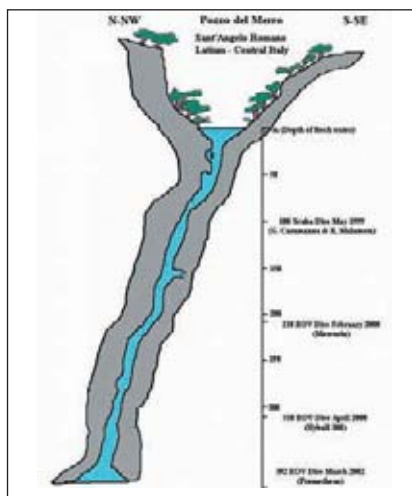


Fig. 2 - Sezione verticale del Pozzo del Merro



Fig. 3 - Il Pozzo del Merro

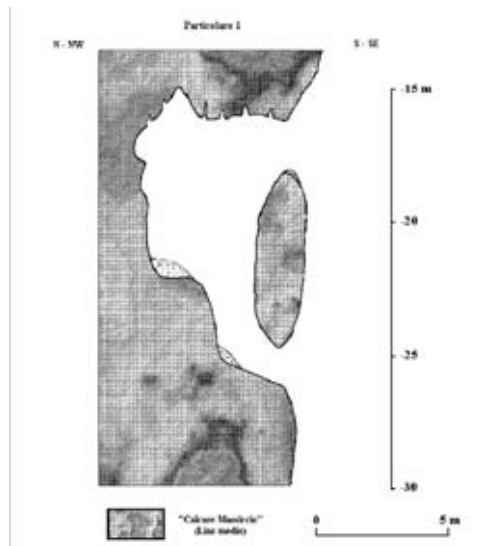


Fig. 4 - Cavità laterale Pozzo del Merro



Fig. 5 - Ingresso della cavità

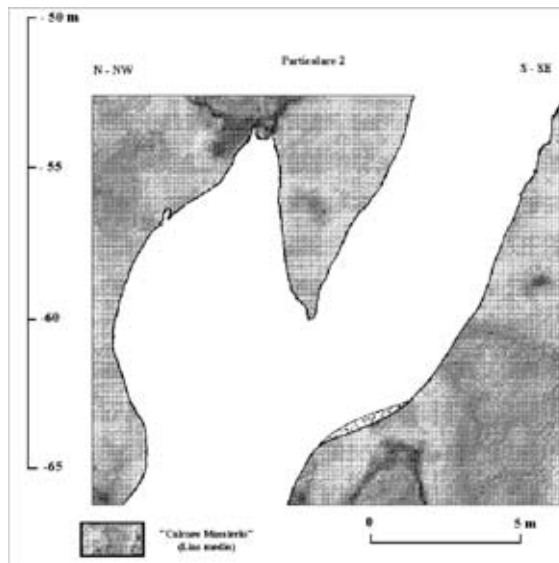


Fig. 6 - Cavità laterale Pozzo del Merro



Fig. 7 - Volta della cavità

so che un flusso in uscita. Il Lago Colonnelle (prof. massima 57 m) è più piccolo ed è caratterizzato dall'essersi impostato su una frattura all'interno del travertino. Sul fondo è presente una polla sorgentizia (Fig. 8-10).

La loro origine è da attribuirsi alla dissoluzione della lente di travertino a seguito di variazioni del chimismo delle acque circolanti che sono passate da una fase di deposizione del carbonato di calcio ad una di dissoluzione del minerale.

Le acque dei laghi sono ipotermiche (23°C) con elevati apporti in gas (principalmente CO₂) e composizione ricca in solfuri. Da notare la presenza di accumuli di zolfo bianco e colonie di solfobatteri (Fig. 11, 12).

Il terzo sinkhole si trova a poche centinaia di metri dalle Acque Albule ed è il Lago di S. Giovanni. Anche questo si apre nel travertino ed indagini dirette speleosubacquee hanno dimostrato trattarsi di una antica grotta, successivamente allagata per la risalita della piezometrica, venuta a giorno per il crollo della volta. Sulla volta e lungo le pareti della

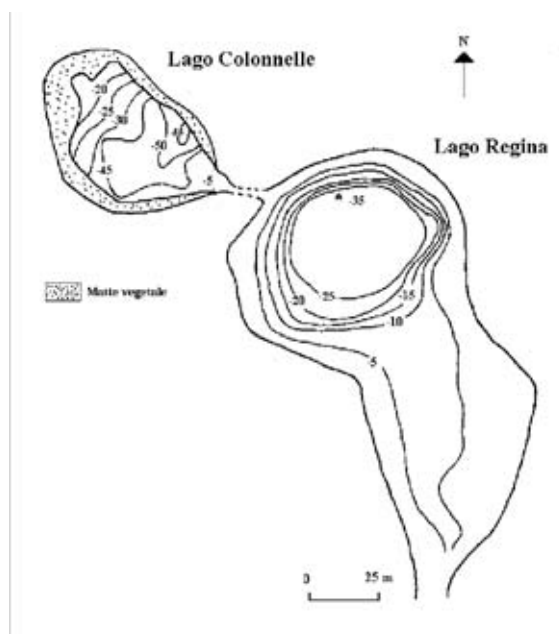


Fig. 8- Batimetria delle Acque Albule (da PENRECOST, 1989 mod.)



Fig. 9 - Il Lago Regina

cavità sono presenti degli speleotemi (Fig. 13-17).

Il chimismo delle acque è più schiettamente bicarbonato-calcico e non sono presenti apporti geotermici rilevabili.

Che tutti questi sinkholes siano dei piezometri naturali della falda regionale è dimostrato anche dal fatto che si è assistito, negli ultimi anni, ad un forte depauperamento della risorsa idrica e ad un conseguente marcato abbassamento del livello nei laghi. Il fenomeno è stato particolarmente evidente nel Pozzo del Merro.



Fig. 10 - Immersione nelle Acque Albule



Fig. 11 - Solfobatteri nel Lago Regina



Fig.12 - Pseudostalattite Lago Colonnelle

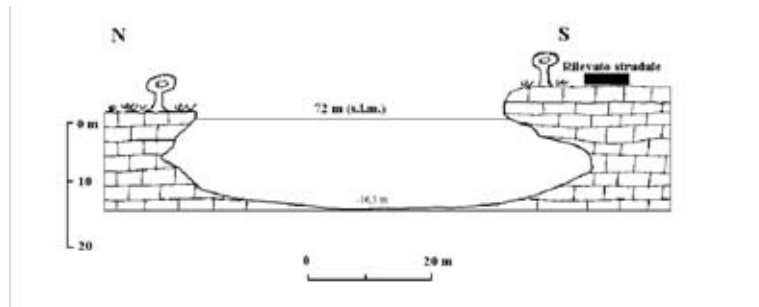


Fig. 13 - Sezione verticale Lago S. Giovanni



Fig. 14 - Lago S. Giovanni

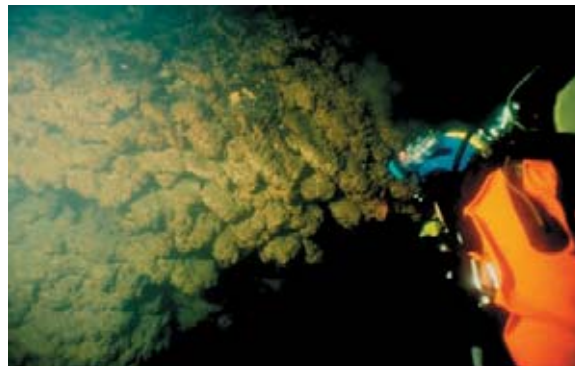


Fig. 15 - Parete sommersa Lago S. Giovanni

1.2. El Zacaton ed i sinkholes di Rancho la Azufrosa

L'area, interessata dalla formazione di una serie di imponenti sinkholes allagati, è ubicata nello Stato di Tamaulipas nel Messico nord orientale. Tra il medio ed il tardo Cretacico questa regione è stata interessata da sedimentazione carbonatica, originatesi dalle acque dell'antico Golfo del Messico, con spessori dell'ordine di 400 metri (ENOS, 1989; GOLDHAMMER, 1999). Tra il Paleocene e l'Oligocene l'area subisce l'Orogenesi Laramide, lo stesso sollevamento che ha creato le Montagne Rocciose. La Sierra de Tamaulipas, una catena montuosa a Nord del Rancho La Azufrosa, si è sollevata durante questo pe-



Fig. 16 - Speleotema Lago S. Giovanni



Fig. 17 - Speleotema Lago S. Giovanni

riodo ed oggi costituisce l'area di ricarica dell'acquifero basale che affiora nei sinkholes (CAMACHO, 1993). I sinkholes principali sono allineati circa W-E, per una distanza di meno di un chilometro, lungo fratture tettoniche connesse all'orogenesi della Sierra de Tamaulipas. Dall'Oligocene Medio al Pliocene la Sierra de Tamaulipas viene interessata da attività vulcanica che perdura sino a 250.000 anni fa nel complesso di Villa Aldama (CAMACHO, 1993). Si presume che la citata area sia interessata da attività geotermica collegata al vulcanismo e che fluidi mineralizzati di origine profonda interagiscano con la falda che affiora nei sinkholes (GARY, 2000) (Fig. 18, 19).

Il sinkhole di Zacaton è il più grande tra quelli studiati con una profondità stimata di oltre 330 metri (Courbon; 1989). La cavità allagata è stata esplorata direttamente da Jim Bowden nel 1994 fino alla profondità di 284 metri mediante immersioni SCUBA a circuito aperto (GILLIAM, 1996). Sulla superficie si trovano alcune isole galleggianti costituite da piante acquatiche (Zacata) che danno il nome alla voragine (Fig. 20). Lungo le pareti sono presenti estese coperture di solfobatteri ed alghe (Fig. 21). Il sinkhole è in connessione, attraverso un tunnel lungo circa 200 metri, con la vicina sorgente de El Nacimiento. Nel tunnel si è osservato un apprezzabile flusso di acqua che fuoriuscendo dal sinkhole alimenta la sorgente stessa (GARY, 2000).

Il sinkhole di Poza Caracol si trova poco a Est di Zacaton e potrebbe essere collegato a questo mediante un tunnel laterale. Il chimismo delle acque di entrambi i sinkholes è simile con la presenza di piccole "matte" sulla superficie originate da alghe e solfobatteri (GARY, 2002, GARY et alii, 2002).

Il sinkhole Verde (Fig. 22) ha caratteristiche idrochimiche sostanzialmente diverse ed anche la morfologia differisce con la presenza di un fondo praticamente piatto. Secondo GARY (2000) il sinkhole Verde potrebbe essersi originato per deposizione e stratificazio-

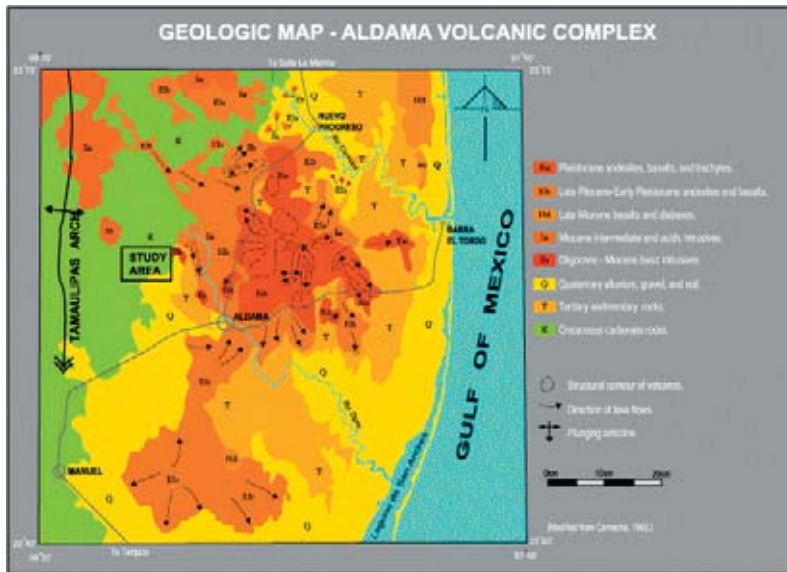


Fig. 18 - Schema geologico dell'area del sistema Zacaton (GARY, 2000)

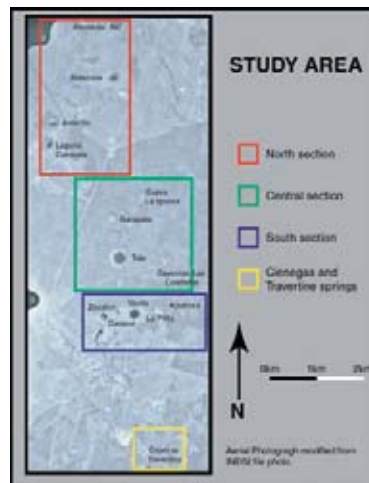


Fig. 19 - Immagine area del sistema Zcaton (GARY, 2000)

ne di materiali travertinosi sul fondo con funzione di barriera tra la falda mineralizzata profonda, che affiora liberamente negli altri sinkholes, e quella che riempie la cavità, di origine superficiale. Saremmo dunque in presenza di una particolare falda sospesa il che spiegherebbe la forte differenza tra il chimismo delle acque di Verde e quelle delle altre voragini. Nella campagna di studio condotta dagli autori nel 2003 lungo una frattura laterale si è identificata una sorgente subacquea di acqua calda ($T > 30^{\circ}\text{C}$).

Nei sinkholes di La Pilita e Azufrosa (Fig. 23, 24) si assiste alla precipitazione di carbonato di calcio con la formazione di una pellicola sulla superficie libera dell'acqua. Si originano anche imponenti strutture travertinose incrostanti come è tipico in sistemi idrotermali che interessano materiali calcarei (FORD & WILLIAMS, 1989).

Indagini geoelettriche compiute nel gennaio del 2003 nell'area de La Pilita hanno evi-



Fig. 20 - Zacaton con le isole galleggianti



Fig. 21 - Solfobatteri ed alghe nel sinkhole Zacaton



Fig 22 - I sinkholes Verde (sinistra) e La Pilita (GARY, 2000)

denziato la presenza di ampi vuoti sotto la copertura di travertino in affioramento. Alcune immersione effettuate nella cavità hanno confermato le informazioni della geoelettrica evidenziando che, alla profondità di circa 20 metri, il perimetro del lago si allarga originando uno sgrottamento di notevoli dimensioni (superiore ai 50 metri) il cui tetto è costituito dal travertino e del quale non si individua il fondo. Il tetto travertinoso è ricoperto da un feltro di solfobatteri ed alghe simili a quelli che si rinvergono lungo le pareti di El Zacaton.



Fig. 23 - Travertini a La Pilita



Fig. 24 - Sinkhole La Azufrosa

Analisi isotopiche dei rapporti $Sr\ 86/Sr\ 87$ delle acque che alimentano il sistema Zacaton evidenziano un valore inferiore a quello previsto per le acque circolanti nei calcari turoniani dell'area. Questo si può spiegare con un apporto, alla falda freatica, di acque derivate dal complesso vulcanico di Aldama. Anche le imponenti dimensioni dei sinkholes, la presenza di fluidi mineralizzati e geotermici lasciano ipotizzare di essere in presenza di un carsismo amplificato dall'azione di fluidi aggressivi di origine vulcanica (GARY et alii, 2003).

2. METODOLOGIE DI STUDIO

2.1. Il Pozzo del Merro e le Acque Albule

La situazione ambientale del Pozzo del Merro ha reso necessario l'utilizzo di particolari tecniche di progressione subacquea al fine di poter eseguire, in completa sicurezza, le operazioni di campionamento e rilievo geomorfologico della sezione allagata.

In una fase iniziale si è provveduto all'esplorazione diretta del condotto carsico fino alla profondità di 100 metri. Tale esplorazione è stata condotta con tecniche speleosubacquee e con l'impiego di apposite miscele respirabili a profondità elevate.

Successivamente, mediante una serie di immersioni, si è provveduto al rilevamento geomorfologico di massima del condotto principale e di alcune diramazioni più importanti. In questa fase si è altresì provveduto alla documentazione fotografica e video della cavità. Sono anche stati prelevati dei campioni d'acqua per successive analisi in laboratorio.

Grazie alla fattiva collaborazione del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, ed in particolare dei Nuclei Sommozzatori, si sono potute impiegare, per la prima volta in questo tipo di ambiente, dei mezzi robotizzati (R. O. V.). Gli R. O. V. (Remote, Operated, Vehicle) sono delle macchine teleguidate dalla superficie che possono raggiungere elevate profondità e compiere una serie di operazioni che vanno dalla documentazione video alla raccolta di campioni, a manutenzione subacquea. Principalmente sviluppati per le necessità dell'industria off-shore oggi sono ampiamente impiegati in ricerche scientifiche o assistenza a subacquei. Vengono classificati come work class o survey class. I primi sono, in genere, delle macchine imponenti costruite per operazioni di forza e richiedono navi appoggio e logistica complessa. I secondi sono strumenti più piccoli e maneggevoli usati per compiti di indagine visiva. I mezzi in dotazione ai Vigili del Fuoco sono classificati survey class; sono impiegati infatti per compiti di ricognizione subacquea. Nella ricerca al Pozzo del Merro sono stati impiegati tre diversi modelli di R. O. V. (Mercurio, Hyball 300 e Prometeo) che si sono spinti, in tentativi successivi, fino alla base della struttura allagata a 392 metri di profondità dal livello dell'acqua. Attraverso le immagini trasmesse in superficie dalle telecamere dei robot è stato possibile realizzare una mappatura, seppur schematica, dell'intera struttura. In una delle immersioni, con la collaborazione del Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università Roma TRE, ad un R. O. V. è stata collegata una sonda multiparametrica in grado di registrare i valori di pH, temperatura e conducibilità elettrica lungo la colonna d'acqua fino a profondità superiori a quelle raggiunte in precedenza dalla superficie mediante una sonda analoga del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università La Sapienza. Questo perché la forma del condotto carsico presenta una cengia a circa 70 metri di profondità superabile solo da un subacqueo o da un robot in grado di muoversi autonomamente nell'acqua (Fig. 25-27).

Nel caso dei sinkholes che ospitano le sorgenti delle Acque Albule le immersioni sono state finalizzate alla documentazione fotografica e video delle strutture sommerse e al campionamento dell'acqua in prossimità della scaturigine sommersa. La presenza di concentrazioni elevate di gas potenzialmente tossici (CO_2 e H_2S) e la forte aggressività chimica delle acque ha comportato l'impiego di sistemi di protezione per gli operatori subacquei. In particolare sono state impiegate delle maschere di tipo full-face e delle mute stagne in grado di isolare completamente il corpo del subacqueo dal contatto con l'acqua. L'esposizione ad acque aggressive ha comunque causato un precoce invecchiamento delle parti metalliche delle attrezzature richiedendo interventi di manutenzione e sostituzione molto più ravvicinati che in un uso "tradizionale". Di questo bisogna tenere debito conto in fase di programmazione degli interventi per garantire sempre la sicurezza degli operatori.

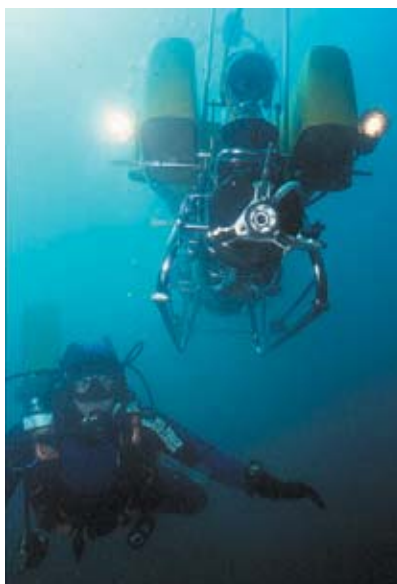


Fig. 25 - ROV Mercurio (foto VVF)



Fig 26 - ROV Hyball 300

2.2. El Zacaton ed i sinkholes di Rancho la Azufrosa

El Zacaton è il più imponente dei sinkholes presenti nell'area di Rancho la Azufrosa, il cui nome lascia intendere la presenza di emanazioni gassose sulfuree. L'esplorazione della parte sommersa è stata effettuata da un team di speleosubacquei e ricercatori statunitensi a partire dagli anni '90. Sono state impiegate miscele particolari per consentire di raggiungere profondità superiori ai 200 metri agli operatori subacquei. All'esplorazione diretta si è affiancato un monitoraggio continuo delle temperature, mediante il posizionamento di un data logger, e misurazione di pH, e conducibilità elettrica mediante una sonda multiparametrica trasportata in immersione dai subacquei. Gli altri sinkholes allagati sono stati studiati mediante immersioni dirette e, nel caso di quello noto come "La Pilita" anche con metodi geoelettrici al fine di definire le reali



Fig. 27 - ROV Prometeo con la sonda multiparametrica

dimensioni della parte allagata nell'ipotesi di una continuità morfologica con altri sinkholes limitrofi (Verde e La Azufrosa).

La presenza di gas, pur essendo chiaramente avvertibile, non è mai tale da richiedere particolari sistemi di protezione.

La parti emerse dei sinkholes sono state mappate mediante uno scanner laser (LADAR) in grado di ricostruire un'immagine tridimensionale in alta risoluzione delle strutture presenti. L'immagine generata dallo scanner è stata successivamente inserita in sistema arc-gis in modo da avere un database georeferenziato. Per fare questo sono stati sistemati una serie di capisaldi in tutta l'area acquisendone l'esatta posizione mediante un GPS differenziale e mediante triangolazione al suolo ove il segnale satellitare non era sufficientemente chiaro, ad esempio sotto coperture vegetali spesse o in prossimità di pareti rocciose e cenge.

Nel corso della spedizione di gennaio 2003 si sono anche esplorate, e mappate, delle grotte presenti nell'area dei sinkholes. Queste cavità sono collegate ad un esteso reticolo carsico ipogeo a prevalente sviluppo orizzontale con estensione di diversi chilometri. In un prossimo futuro l'University of Texas at Austin, in collaborazione con la NASA, prevede di impiegare un robot subacqueo appositamente realizzato per raggiungere il fondo di Zacaton realizzando una mappatura acustica tridimensionale della struttura in modo analogo a quello impiegato per il rilievo subacqueo del sistema sorgentizio di Wakulla Spring in Florida (Fig. 28).

CONCLUSIONI

In entrambe le aree studiate, Rancho la Azufrosa e sistema Monti Cornicolani – Piana di Tivoli, siamo in presenza di affioramenti carbonatici in prossimità di aree vulcaniche con attività geotermale, zone di degassamento e sistemi di faglie di estensione regionale.

I sinkholes sembrano chiaramente allinearsi lungo le direttrici tettoniche principali e sono sede dell'affioramento della falda basale con locali apporti di fluidi mineralizzati che,

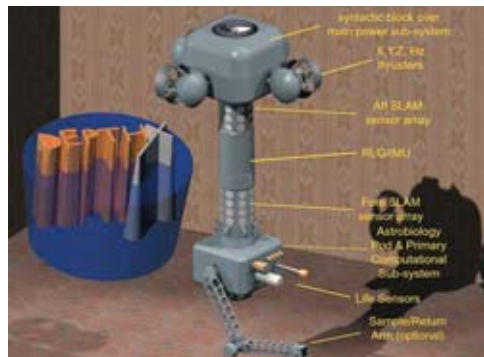


Fig. 28 - Il sistema di mappatura sonar per i sinkholes (GARY, 2000)

verosimilmente, utilizzano le dislocazioni tettoniche come via di risalita preferenziale. L'erosione carsica, alla base della formazione delle cavità, può essere stata incrementata dal mescolamento di acque a diversa mineralizzazione e, soprattutto, dalla presenza di fluidi acidi in grado di attaccare con maggior efficienza il substrato carbonatico. La presenza di acque dal chimismo particolare, e dalla termalità anomala, ha permesso lo sviluppo di solfobatteri che hanno colonizzato le pareti delle voragini (Acque Albule, Zacaton, La Pilita, La Azufrosa) a volte in associazione con alghe. Il fatto che i sinkholes costituiscano una sorta di piezometri naturali mettendo in collegamento la falda regionale con l'ambiente esterno è da prendere in considerazione, soprattutto in aree densamente antropizzate, ai fini della salvaguardia della risorsa idrica da potenziali inquinamenti. L'impiego dell'immersione scientifica, in abbinamento all'uso di robot subacquei, si è dimostrato valido per la raccolta di dati in ambienti altrimenti non esplorabili o studiabili in modo esaustivo.

BIBLIOGRAFIA

- CAMACHO ANGULO F. (1993) - *Compilación Geológica de la Vertiente del Golfo de México, Área. Comisión Federal de Electricidad Departamento de Geología* **G-43**, 23-130.
- CHIOCCHINI M., MANCINELLI A. (1978) - *Ricerche geologiche sul Mesozoico del Gran Sasso d'Italia (Abruzzo). III. Correlazioni tra le facies di margine della piattaforma carbonatica e facies pelagiche del Giurassico e Cretaceo inferiore. Studi Geologici Camerti* **4**.
- CHIOCCHINI M., MANGANELLI V., PANNUZI L. (1979) - *Ricerche geologiche sul Mesozoico della Sabina (Lazio). I Monti Cornicolani. Boll. Serv. Geol. d'Italia* **100**, 235-264.
- CREMA C. (1915) - *Improvvisa formazione di una dolina presso Montecelio. Boll. Soc. Geol. It.* **34**, 273-276.
- ENOS P. (1983) - *Sedimentation and diagenesis of Mid-Cretaceous platform margin - East Central Mexico. Dallas Geological Society.*
- FACENNA C., FUNICIELLO R., MONTONE P., PAROTTO M., VOLTAGGIO M. (1994) - *Tettonica trascorrente del pleistocene superiore nel bacino delle Acque Albule (Tivoli, Lazio). Mem. Descr. Carta Geol. d'It.* **49**, 37-50.
- FORD D., WILLIAMS P. (1989) - *Karst geomorphology and hydrology. Chapman and Hall* **20**, 448-451.
- GARY M. (2000) - *Speleogenesis of Zacaton and cenotes of Rancho La Azufrosa. American Academy of Underwater Science 2000 annual workshop.*
- GARY M. (2002) - *Understanding Zacaton: exploration and initial interpretation of the*

- worlds deepest known phreatic sinkhole and related karst features southern Tamaulipas, Mexico. Karst Water Institute, special publication **7**, 141-145.
- GARY M., SHARP J., HAVENS R., STONE W. (2002) - Sistema Zacaton: identifying the connection between volcaniv activity and hypogenic karst in a hydrothermal phreatic cave system. *Geo²* **29**, 3-4.
- GARY M., SHARP J., CARAMANNA G., HAVENS R. (2003) - Volcanically influenced speleogenesis: forming el sistema Zacaton, Mexico and Pozzo del Merro, Italy, the deepest phreatic sinkholes in the world. GSA Annual Meeeting 2003 Seattle – Paper **19-4**
- GILLIAM B. (1996) - Deep Diving. North Eastern Divers
- GOLDHAMMER R.K. (1999) - Mesozoic sequence stratigraphy and paleogeographic evolution of Northeast Mexico. Geological Society of America, Special paper **340**, 3-14.
- MATTEI M., MONTONE P., SALVINI F. (1986) - Analisi strutturale dei rilievi del margine appenninico intorno a Tivoli (Roma). *Mem. Soc. Geol. It.* **35**, 579-589.
- MAXIA C. (1948) - Studi geologici sui Monti Cornicolani (Lazio). *La Ric. Sc.* **18** Roma, 397-399
- MAXIA C. (1962) - La Serie Liassica nei Monti Cornicolani e Lucretili. *Boll. Serv. Geol. d'Italia* **62**, 73-78
- PENTECOST A. (1989) - Bagni di Tivoli, Lazio: A modern travertine depositing site and its associated microorganisms *Boll. Soc. geo. It.* **108**, 315-324
- SEGRE A.G. (1948) - I fenomeni carsici e la speleologia del Lazio. *Pubblicazioni dell'Istituto di Geografia dell'Università di Roma, Serie A*, **7**, 61-67

RINGRAZIAMENTI

Riccardo Malatesta
Simone Formica
Il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco
Il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università "La Sapienza" di Roma
Il Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università Roma TRE di Roma
Texas University at Austin
John (Jack) Sharp
Robin Havens
Jim Bowden
Assessorato all'Ambiente della Provincia di Roma
Società Acque Albule
Palmiro Bernardini