

Il sistema carsico della “Montagna di Cesi”

Laboratorio di meteorologia ipogea

a cura di

Lucio Di Matteo, Simona Menegon, Augusto Rossi

Con il contributo della Fondazione Cassa di Risparmio di Terni e Narni

- settore Ricerca scientifica e tecnologica DPP 2014 -

Il sistema carsico della “Montagna di Cesi”

Laboratorio di meteorologia ipogea

Edizione Aprile 2016 - Tutti i diritti riservati: i contenuti del presente volume (testo, foto, figure e grafica) possono essere utilizzati citando gli autori e la fonte.

A cura di:

Lucio Di Matteo (Dipartimento di Fisica e Geologia, Università degli Studi di Perugia)

Simona Menegon, (Associazione Culture Sotterranee, Terni)

Augusto Rossi (Associazione Culture Sotterranee, Terni)

Con la collaborazione di *Stefano Liti* (Geologo Libero Professionista, Acquasparta – Terni)

Copertina (dall'alto verso il basso): vista panoramica della “Montagna di Cesi”, interno della grotta degli Arnolfi, grafico della temperatura dell'aria interna ed esterna a grotta degli Arnolfi.

Si ringrazia la **Fondazione Cassa di Risparmio di Terni e Narni** per aver sostenuto e finanziato il progetto

WEB: www.culturesotterranee.it

WEB: www.fisgeo.unipg.it

ISBN: 979-12-200-1008-5

www.tecnograficarossi.it

“You have been told of the Aeolian hills, the prisons of the winds”

An English Gentleman

Indice

PREFAZIONE	7
INTRODUZIONE	9
1 - L'ARIA DELLE GROTTI DI CESI NELLA STORIA	11
2 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO ED IDROGEOLOGICO	17
3 - LE FORME CARSIICHE: GENESI E PROCESSI	23
4 - LA CIRCOLAZIONE D'ARIA NELLE GROTTI: STATO DELLE CONOSCENZE	27
5 - LE GROTTI DEL MASSICCIO DI CESI	29
6 - IL MONITORAGGIO DELLE GROTTI DEL MASSICCIO DI CESI	35
7 - ANALISI DEI RISULTATI E PROSPETTIVE DI SVILUPPO FUTURE	47

Prefazione

Nel febbraio 2013 Perugia ha ospitato il convegno “Dialogo intorno al Paesaggio. Percezione, interpretazione, rappresentazione” che ha riunito oltre cento tra geologi, geografi, storici, architetti, ingegneri e agronomi in una serie di sessioni scientifiche diversificate per tematiche ma unite da un filo conduttore comune: il Paesaggio. L’idea di Paesaggio abitualmente riconduce a quanto, di naturale o antropico, può essere osservato in superficie ma vi sono paesaggi nascosti, sotterranei, altrettanto affascinanti e scientificamente significativi.

Durante il convegno uno dei contributi più interessanti sugli ambienti carsici ipogei è stato presentato da Lucio Di Matteo, Simona Menegon e Augusto Rossi e ha riportato i primi risultati del monitoraggio termo-igrometrico all’interno della grotta degli Arnolfi nella montagna di Cesi (Terni, Umbria). Da quel primo articolo sono passati alcuni anni, durante i quali agli stessi autori si è aggiunto Stefano Liti e ai risultati iniziali molti altri dati ed elaborazioni che hanno consentito la pubblicazione del presente volume.

Parlare di grotte, in una regione come l’Umbria dove buona parte del territorio regionale è costituita da formazioni rocciose carsificabili è particolarmente importante. Le cavità carsiche ipogee hanno da sempre affascinato l’uomo che in esse ha trovato riparo, sacralità e benessere economico. Delle grotte della montagna di Cesi si ritrova notizia sin dalla metà del ‘600 e, seppur oggetto d’interesse da parte della comunità speleologica, non sono ancora che in minima parte esplorate e note. Eppure, come gli Autori evidenziano perfettamente, le grotte rivestono un ruolo chiave nella circolazione idrica sotterranea diretta verso una delle aree sorgentizie regionali più importanti: le sorgenti di Stifone, in provincia di Terni; geosito, emergenza naturalistica e punto di grande valore estetico ed economico. Il pregio del volume è riportare, con estremo rigore scientifico, i dati e le interpretazioni che seguono ad anni di rilevamenti e misurazioni per la comprensione delle condizioni ambientali di almeno cinque cavità individuate in questo settore meridionale della catena montuosa dei M. Martani e dell’inversione del flusso d’aria che si verifica durante le variazioni stagionali annuali.

I risultati inoltre sono la base per nuovi approfondimenti sia delle conoscenze sulle cavità finora rinvenute che del resto del complesso carsico ipogeo, ancora ampiamente inesplorato. Il volume è quindi una conclusione e un inizio di future ricerche nelle quali gli Autori sapranno ancora infondere la medesima competenza scientifica e la stessa passione che emerge da ogni pagina di questo validissimo e affascinante volume.

Perugia, 06 aprile 2016

Laura Meelli

Introduzione

Il massiccio calcareo di Monte Torre Maggiore (Cesi, Terni), qui denominato “Montagna di Cesi”, proprio per le peculiarità che lo caratterizzano, sia dal punto di vista storico, geologico e paesaggistico, ha sempre suscitato l'interesse degli esploratori del sottosuolo, gli speleologi, che nel corso degli anni hanno cercato altre grotte, oltre a quelle già esplorate da tempo, con risultati non molto incoraggianti, se si esclude la scoperta, del tutto casuale, di Grotta Gis, nel 2002. L'esplorazione speleologica moderna è sempre più spesso affiancata da misure in continuo di varia natura le quali sono rese possibili anche grazie alla riduzione dei costi delle tecnologie applicate. Tra queste molto interessanti sono gli strumenti che permettono di studiare la meteorologia ipogea: la comprensione dei fenomeni fisici che avvengono all'interno delle cavità, incluse le relazioni con l'ambiente esterno, racchiudono informazioni che, se analizzate nel contesto geologico, idrogeologico e geologico-strutturale del sistema carsico, permettono di individuare le zone su cui focalizzare l'esplorazione speleologica.

Il presente volume nasce dall'interesse reciproco degli scriventi, da diversi punti di vista, di approfondire le conoscenze del sistema carsico della Montagna di Cesi mediante un approccio multidisciplinare. Già nel 2009 le prime misure di temperatura e di umidità dell'aria, in alcune delle cavità, insieme ad una campagna esplorativa mirata, hanno portato all'apertura nel 2013 di una nuova sala in una delle grotte della zona, Grotta degli Arnolfi. Dallo studio sono emerse ottime prospettive che l'ambiente sotterraneo fosse ancora più vasto o connesso ad ambienti sotterranei più grandi, cambiando così la planimetria e l'estensione di una grotta che fino a quel momento era stata ritenuta senza possibilità di esplorazione. Una lettura più attenta del territorio dal punto di vista geologico, l'intensificazione delle misure termo-igrometriche e le prime misure di velocità del flusso d'aria in alcune grotte selezionate della zona, hanno permesso di focalizzare le energie, con l'obiettivo di capire meglio il sistema carsico nel suo complesso e di fare delle ipotesi sulla interconnessione di alcune delle cavità finora conosciute con sistemi più ampi ed articolati del tutto inesplorati. Attualmente sono in corso delle esplorazioni nella zona di Monte Torre Maggiore e nell'area del Fosso di S. Andrea, con alcuni siti molto promettenti, individuati grazie alla convergenza dell'esperienza degli speleologi e delle indicazioni dei geologi.

1 - L'aria delle grotte di Cesi nella storia

La zona montuosa intorno a Cesi, piccolo paesino che si affaccia sulla conca ternana, aggrappato alle pendici meridionali dei Monti Martani, rappresenta un enigma e una sfida per il mondo della ricerca speleologica. La zona abitata sin da epoca preromana dalla popolazione degli Umbri, come attestato dalle numerose emergenze archeologiche, è caratterizzata dalla presenza di cavità carsiche dalle dimensioni più varie, dalla fessura alla vera e propria grotta, tutte accomunate dalla forte circolazione d'aria al loro ingresso. Ma non è solo questo ad avere acceso la fantasia degli esploratori sotterranei, ma soprattutto la commistione di testimonianze storiche, leggende e racconti popolari.

Sebbene non è facile reperire documenti e letteratura storica specifica riguardante la circolazione dell'aria nelle grotte di Cesi tuttavia delle fonti reperite tramite archivi online o da bibliografie di studi pubblicati, hanno riportato alla luce testimonianze di autori che hanno documentato e cercato di descrivere il fenomeno.

Monsignor Felice Contelori è un membro di un'importante famiglia di Cesi, vissuto nella prima metà del 1600, studioso e letterato. Tra le sue molte opere ce ne è una dedicata al proprio paese natale, Cesi. In questo libretto, pubblicato postumo nel 1675, tratta della storia e delle caratteristiche di Cesi e vi sono menzionate anche le grotte, che soffiano aria fredda in estate e aspirano aria in inverno “...nelle quali l'Inverno spira un vento, che attrabe dentro le grotte un panno, che alla bocca si metta- Nell'Estate il vento raffredda, e quanto è più caldo di fuori, tanto è più freddo il vento che spira”¹. Contelori localizza le cavità sul monte vicino al paese, descrive l'abitudine degli abitanti di lasciarvi al fresco gli alimenti e aggiunge anche delle indicazioni su chi prima di lui aveva già parlato di questo fenomeno.

Il primo è Gasparo Murtola, funzionario pubblico di Genova, che aveva avuto l'incarico di commissario e governatore in molte città dell'Umbria, tra cui Cesi. Il Murtola era anche un poeta abbastanza conosciuto, e in un suo poema del 1608 “Della creazione del mondo”, nella parte dedicata all'Italia, ci sono dei versi dedicati alle grotte ventose di Cesi “E Grotte, dove per Cannali spira/condotto il Vento, e obliquamente gira”², tanto mirabili da essere definite “Miracolo del Cielo, e di Natura/Dove fu tal meraviglia, dove?”. Le canalizzazioni dell'aria permettono quindi di avere l'aria a piacimento “Quivi l'hai sempre, o voglia leggiere/Overo più crucciosa, over più fera”, tanto che neanche il solleone di Agosto, durante la canicola, può vincere la frescura di quest'aria “Ne l'adusto Leon col suo cocente/fiato la febre sopra l'herbe attende/in vano il Cane qui rabbioso sente/stimolo al Cor che infuriato il rende;/Cha a quella Aura pieghevole, e gentile/Il Maggio hai ne l'Estate, e hai l'Aprile.”.

La seconda citazione di Contelori è riferita ad Andrea Bacci, filosofo, medico e scrittore di S.Elpidio a Mare, che nel 1571 scrive un trattato sulle acque “De Thermis”. Vi menziona Cesi, dove dai monti sopra al paese, il vento viene convogliato con dei tubi, allo stesso modo dell'acqua, per rinfrescare a piacere le stanze. “...è clivo praealti montis manufacta sunt spiracula, è quibus ad libitum, sicut aquas, per tubos frigidissimas excipiunt auras...”³. Il Bacci dà anche delle spiegazioni dei venti che escono dalle cavità, che attribuisce sia al calore racchiuso, sia agli incendi che a

1 – Felice Contelori “*Memorie Historiche della terra di Cesi*” – per Nicolò Angelo Tinaffi, Roma 1675 - books.google.it

2 – Gasparo Murtola “*Della Creazione del Mondo – Poema Sacro*” – Evangelista Deuchino et Gio. Batt. Pulciani – Venezia 1608 – books.google.it

3 – Andrea Bacci “*De Thermis*” - Typographia Icoibi Mascardi – Roma - 1622 - www.archive.org

movimenti antiperistaltici, che comprimendo l'aria, la fanno uscire da ogni apertura che trova "...*& quaquam viam inveniunt, penetrant ad aliquem exitum...*"), e quando non trova l'uscita la pressione interna è tale da provocare terremoti e distruzioni "...*non inveniunt exitum, vel quatunt terram, vel dirumpunt loca...*".

Successivamente le grotte di Cesi sono state oggetto dell'interesse scientifico di Athanasius Kircher, un gesuita, storico, filosofo, museologo tedesco, vissuto nel XVII secolo. Come comunemente accadeva all'epoca, gli interessi di Kircher erano innumerevoli e nel suo libro più famoso, *Mundus Subterraneus*, del 1678, nel libro II, De Opificio Globi Terreni, al Capitolo XIX, racconta di aver visitato la zona di Interamna, volgarmente detta Terni. Oltre alla Cascata delle Marmore, che descrive con parole molto suggestive, Kircher si reca a Cesi, di cui ha sentito cose meravigliose. Qui, come illustrato da Giovanni Badino in un suo recente articolo⁴, rimane meravigliato dalle opere di canalizzazione dell'aria costruite dagli abitanti del paese, che sfruttano le correnti che escono dalle fessure delle rocce per tenere al fresco ogni sorta di alimento. Quello che colpisce Kircher è soprattutto la ciclicità del flusso d'aria stagionale e giornaliero: "*Siquidem tempore aestivo per omnes fissuras & rimas vehementissimos efflat Ventos*"⁵ (Durante il periodo estivo, da ogni fessura o crepa soffiano violentissimi venti). "... *Ventorum expirationes non quolibet anni die, neque qualibet diei hora, sed aestivis solummodo mensibus, quator ante meridiem, e todidem post, horis compeuntur*" (... lo spirare del vento non è accertato in ogni periodo dell'anno o in ogni ora del giorno, ma solo nei mesi estivi e quattro ore prima del mezzogiorno e altrettante ore dopo). Nota poi che in inverno il flusso si inverte tanto da aspirare oggetti leggeri posti davanti alla fessura, con una forza tanto maggiore quanto minore è la temperatura esterna. Infine attribuisce all'influenza dell'aria la particolar salubrità del luogo, i cui abitanti non vengono colpiti da "*febriles alterationes*" che mietono vittime in altri luoghi. Dopo queste annotazioni Kircher si lancia in una disamina delle possibili spiegazioni del fenomeno, escludendo una per una quelle più in voga all'epoca, in quanto contrarie alle osservazioni ("quod est contra experientiam"), per poi fornire le proprie spiegazioni ponendo al centro del fenomeno circolatorio la rarefazione dell'aria quando riscaldata. In una edizione del 1624 di un trattato di Vincent de Beauvais, un monaco francese vissuto nella prima metà del XIII sec., che scrive intorno al 1250 una monumentale opera enciclopedica, *Speculum Maius*, compendio di tutte le conoscenze dell'epoca, c'è una sezione dedicata alle cause dei venti (Volume *Speculum Naturae*), ed in particolare all'origine dei venti ipogei, che ritiene causati dalle cataratte d'acqua sotterranee. Kircher confuta questa causa ritenendola contraria alle osservazioni in quanto i flussi d'aria nelle grotte non erano costanti.

I viaggiatori stranieri che attraversavano l'Italia, tra il XVIII e il XIX secolo, per il viaggio culturale e di istruzione che veniva definito "Grand Tour", i cui diari di viaggio spesso venivano poi pubblicati come guida per altri viaggiatori, non ignoravano la particolarità di questa zona, e se Goethe, nel suo "Viaggio in Italia" nel 1786 nota solo che le montagne intorno a Terni sono tutte di calcare, altri viaggiatori prima di lui hanno descritto il fenomeno delle bocche soffianti di Cesi.

Nel 1687 un precettore francese, Maximilien Misson, percorre con il suo allievo l'Italia e da questo viaggio ne ricava un libro "*Voyage d'Italie*" in cui riporta "*je voudrais qu'on y comprît aussi celui du Monte Eolo: il est proche de la petite ville de Césis, à huit mille de Terni; on voit là une chose fort singulière. De trous & des fentes de cette montagne, il sort continuellement des vents froids, fur-tout en Été. Les habitants de Césis conduisent ces vents par des tuyaux ans leurs caves & dans leurs maisons; pour rafraîchir les vins & pour rafraîchir eux – mêmes pendant les chaleurs. Ils ouvrent plus ou moins le tuyau, & prennent telle*

4 - Giovanni Badino "Il vento ipogeo: una storia delle prime osservazioni" in Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan" Vol. 46 pp 31-70, Trieste 2016

5 - Athanasius Kircher "*Mundus subterraneus*" Tomo I – Joannes Janssonium à Waessberge & filios - Amsterdam 1678 - www.archive.org

quantité de fraîcheur qu'ils en veulent avoir.”⁶ “Vorrei che comprendeste anche quello (il viaggio) a monte Eolo: si trova vicino al piccolo villaggio di Cesi a otto miglia da Terni; si vede là una cosa molto singolare. Dai buchi e dalle fessure della montagna escono continuamente venti freddi, soprattutto in estate. Gli abitanti di Cesi li convogliano con dei tubi verso le loro cantine e case, per rinfrescare i vini e loro stessi, quando è caldo. Loro aprono più o meno il tubo e prendono il fresco che vogliono”

Edward Wright, viaggiatore inglese⁷, intorno al 1720 passa per Terni e si reca a Cesi per visitare le colline di Eolo (Aeolian Hills), attratto anche lui dalla fama del posto. Arriva sul posto a dorso di cavallo e non riceve certo una bella impressione né dal paese, che definisce nient'altro che “*poor for?*”, né tantomeno dagli abitanti (“*We saw nobody at work; but a parcel of idle fellows, with their cloaks, once black, thrown about 'em al' Italiano, lounging and gaping at one another*”) “non abbiamo visto nessuno al lavoro, ma un gruppo di sfaccendati con i loro mantelli, scoloriti, gettati su di loro alla maniera italiana, bighellonando e sbadigliando uno con l'altro”. Ha un primo momento di disappunto, in quanto in quel momento dalle famose grotte non esce nessun vento, ma si consola trovando la spiegazione di questo fenomeno nella differenza di temperatura tra interno ed esterno che provoca variazioni della densità dell'aria, differenze che almeno qualche volta dovranno annullarsi “*And of consequence when the density of the outer and inner Air is upon a par, which must be sometimes, there can be no current either way*”. Si fa accompagnare in alcune caverne, sulla collina sopra il paese “*Whithin that part of the hill which lies above the town*”. La prima grotta è chiusa da una porta, fuori dalla quale sentono provenire un rumore talmente forte da paragonarlo al fragore della cascata delle Marmore, da loro visitata il giorno precedente, ma al momento dell'apertura, quando si aspettano di essere scaraventati via dalla forza del vento (*...as almost expecting to be blown backwards, when the door should be open'd*), non sentono uscire nessuna corrente. Ma anche qui il narratore risolve brillantemente il mistero, verificando con dei lumi che l'aria entra dentro la grotta e quindi il rumore era provocato dall'aria in ingresso che si infiltrava nelle fessure della non perfetta chiusura della porta. Wright definisce il fenomeno come un'antiperistalsi, perché probabilmente vede il fenomeno tipo l'aria che entra e esce da un palloncino, ma certo le grotte non si contraggono come un intestino! Visitano anche un'altra grotta, più grande, che si inoltra nelle viscere della montagna, dove a suo dire ci sono diversi “abissi” “*They brought us then into another larger Cave, which had within it several further chasms, which went into the bowels of the rock...*”: questa affermazione rafforza la necessità di approfondire le ricerche speleologiche in alcune aree del massiccio di Cesi. Anche a Wright vengono mostrate le opere di canalizzazione dell'aria, usate per rinfrescare cibi e locali, presenti nella chiesa e nella casa di un gentiluomo locale, dato che tutto sommato gli abitanti non erano tutti dei tipi loschi come aveva temuto appena arrivato, dove trova l'iscrizione: “*Aura, que per aeris regionem libera pererrabat; a Petro Spada huc veluti captiva deducta, Hospes, tuis conatur famulari deliciis*” (La brezza, che errava libera nell'atmosfera, convogliata qui come prigioniera da Pietro Spada, ospite per cercare di servire il tuo piacere), e conclude consigliando agli inglesi lo stesso sistema di condizionamento, anche se ammette che con il clima inglese non se ne senta molto il bisogno.

Un curioso resoconto, dettagliatissimo, ci proviene da un anonimo autore inglese che nel 1750 scrive lunghissime e colorite lettere da ogni località visitata insieme ad un suo amico⁸. Attirati dalla fama della Collina di Eolo, che definisce “*le prigioni dei venti*”, si avventurano fino a Cesi, dove però subiscono la stessa delusione che aveva provato Edward Wright trent'anni prima, nella medesima grotta. Hanno un primo momento di

6 - Maximilien Misson “*Voyage d'Italie*” Tome IV – Paris 1743 archive.org

7 - Edward Wright “Some observations made in travelling through France, Italy, &c. : in the years 1720, 1721, and 1722 “ - A. Millar in the Strand - London 1764 www.archive.org

8 - English gentleman “*Tour through several parts of Europe and the East*” Vol. II - W. Bristow and C. Etherington, London, 1760 - www.archive.org

sconcerto, condiviso con parecchi altri visitatori, seccati di essere dovuti arrivare non solo a Cesi, ma di essersi arrampicati fino alla grotta tra le rocce “*There were more people accidentally present, and they were as much out of humor as myself with the up-hill journey to Caesium, and with the climbing the hill still higher among these rocks to no purpose*”. Sospettano di essere stati ingannati, si sa come sono fatti gli Italiani...”*and for my own part, I must confess that I was not without suspicious of more than a disappointment*”, non si perdono d’animo e si inoltrano nella caverna più oltre di dove si era avventurato Wright, descrivendola dettagliatamente, dalla polvere sul pavimento che il narratore si chiede come vai non venga spazzata “*but it seems a superstition not to sweep it*”, all’alto soffitto con i massi apparentemente in bilico “*The stone in some places hang out in such a manner, that there seems danger of their falling, but not no such accident ever appened*”. Il compagno del nostro autore trova il coraggio di inoltrarsi per alcune prosecuzioni che a dire delle guide non erano state mai esplorate da nessuno “*no body having ventured to go into them*”, ed è talmente entusiasta da quello che trova da chiedere di essere lasciato là per diverse ore. Quello che succede dopo va letto nell’ottica dell’epoca, in cui lo spirito scientifico non contemplava il rispetto e la conservazione della natura. Il nostro eroe infatti ritorna dalle sue esplorazioni carico, lui e le guide, di concrezioni staccate dalle pareti della grotta (capelli d’angelo “*a strait and beautiful thing resemblig a tube of glass, it was five feet long and of the thickness of one’s finger*” e pisoliti “*round stones of the size of pistol-bullets, and much like whiter kinds of school-boy marbles*” e con un innocente rospo che verrà sacrificato per verificare se veramente, secondo le credenze dell’epoca, la sua testa contenesse pietre. Soddisfatto di sé, mette in subbuglio tutto il paese fornendo consigli e spiegazioni. Esce completamente coperto di polvere bianchissima, definita Lac Lunae “*Milk of the Moonshine*”, che scambia per magnesia (Magnesia Alba), rimedio molto in voga all’epoca, e la consiglia ai medici del luogo. In più rispetto agli autori precedenti, dà una dettagliata spiegazione di come si formino le concrezioni, fatte con particelle minerali “*spar*”, portate dalle goccioline di vapore che vengono dalle profondità della terra, e si condensano sulle pareti fredde della grotta.

Horace-Bénédict de Saussure, naturalista ed alpinista svizzero, nel 1773 compie un viaggio a scopo scientifico in Italia. Il resoconto di questo viaggio viene pubblicato nel “*Journal de physique*”⁹ del 1776, e la parte dedicata a Cesi con le sue “*Bouches d’Eolè*” viene poi ripresa nella sua opera più importante “*Voyage dans les Alpes*”¹⁰ nel capitolo dedicato alle “*Temperatures a de grandes profondeurs*”, in cui si confrontano i dati di diverse grotte, per arrivare alla spiegazione del perché l’aria che ne esce sia così fredda. Nella sua visita a Cesi, nel pomeriggio del 4 luglio De Saussure effettua la prima misura documentata della temperatura dell’aria che esce da queste grotte. L’esperimento viene condotto nella cantina di una casa, che poggia direttamente sulla roccia, dove da una fessura esce la corrente fredda “*Le froid de cette cave, vient comme dans celle que j’ai décrites, non de sa profondeur, mais d’un air froid qui sort par les crevasses d’un rocher, contre lequel elle est bâtie*”. La giornata è insolitamente fredda, tanto che il fenomeno è meno accentuato del solito “*...Que ce phénomène n’étoit pas à beaucoup près aussi sensible qu’il a accoutumé de l’être dans cette saison*”, ma questo non impedisce a De Saussure di misurare la temperatura, con un termometro a mercurio, registrando il valore di 5 e ³/₄ gradi, misurato con la scala Réaumur, che corrisponde a poco più di 7 gradi Celsius. Il dato fornito da De Saussure è molto importante in quanto documenta per la prima volta, mediante un termometro a mercurio, nei limiti dell’affidabilità della misura e del fatto che si tratta di un dato puntuale, la temperatura dell’aria in uscita dalle fessure di Cesi, ad indicare come già duecentoquaranta anni fa la comprensione della meteorologia ipogea di quest’area, ed in generale degli ambienti profondi, fosse uno degli aspetti che affascinava ricercatori e naturalisti dell’epoca e come già allora non si potesse

9 – “*Journal de Physique, de chimie, d’histoire naturelle et des arts*”, Tome VII, Parigi 1776

10 - Horace-Bénédict de Saussure “*Voyage dans le Alpes*”, Tome III, Luis Fauche-Sorel, Neuchatel 1796

prescindere da misure ed acquisizione di dati. Inoltre il dato è da ritenersi ancor più interessante, in quanto si inquadra in quella fase climatologica particolarmente fredda che ha caratterizzato l'Europa dal 1450 fino a circa il 1850 (PEG, Piccola era glaciale): in questo contesto il dato di temperatura dell'aria uscente dalle fessure, che tendenzialmente è più basso di quello misurato oggi nello stesso periodo su grotte vicine, assume maggior significato.

Nel 1770 Johann Jacob Volkmann, uno scrittore tedesco, pubblica "Notizie storico-critiche dell'Italia" che diventerà una guida molto popolare nel suo paese. Anche lui cita Cesi con le sue correnti d'aria in un paragrafo che chiama proprio "Il Monte Eolo": "Le montagne ventose si trovano dall'altra parte di Terni. Sono famose a causa dei venti che si fanno particolarmente sentire, soprattutto in estate, quando soffiano e sbucano dalle crepe e dalle fratture presenti nelle montagne stesse"¹¹. Volkmann non dà notizie di prima mano ma cita le sue fonti che in questo caso sono tre: il primo è proprio Athanasius Kircher, poi troviamo Edward Wright, ed il terzo è l'English Gentleman, anonimo autore delle *Letters of several Parts of Europe and the East written in the Year 1750*.

Nello stesso periodo un altro tedesco Anton Friederich Büsching, geografo e poligrafo, pubblica una ponderosa e innovativa opera dove dà una descrizione di tutta la Terra a carattere statistico-geografico. Un paragrafo è dedicato anche da lui a Cesi "Tre o quattro miglia lontano da Terni verso Nord-Ovest, vicino alla piccola terra di Cesi, è il Monte Eolo, famoso per i venti freschi, che massimamente d'estate vengono fuori dalle fessure e buche de' massi, de' quali è composto questo monte".¹²

Tra coloro che hanno scritto di Cesi e delle sue grotte senza esserci mai stati, troviamo però un nome illustre, Immanuel Kant, il grande filosofo tedesco. I suoi interessi spaziavano anche in altri campi oltre la metafisica e nel 1802 esce una sua opera scientifica, "Geografia Fisica"¹³. Il capitolo 8 del volume IV si intitola "Antri di vento" e non poteva mancare Cesi e il monte Eolo, che Kant riprende dalle descrizioni di Kircher e dell'English Gentleman, riportando la loro spiegazione dei venti freddi in uscita d'estate e l'aria in entrata in inverno, come rottura dell'equilibrio termico tra interno ed esterno.

Dopo la fine del XVIII secolo le tracce di Cesi si perdono nelle guide turistiche ma restano tante citazioni nei libri di geografia, opera di studiosi italiani e stranieri, senza fornire però elementi nuovi rispetto a quanto osservato nel secolo precedente, spesso copiandosi l'uno con l'altro. Un esploratore inaspettato è però Monsignor Vincenzo Tizzani, Vescovo di Terni dal 1843 al 1847. Nella sua opera "Una gita al Santuario di Loreto"¹⁴, pubblicata una quarantina di anni dopo, racconta di come passando da Terni sia preso dai ricordi del periodo trascorso in questa città. Uno di questi ricordi riguarda la scoperta di una grotta a Cesi, nelle cantine della casa del Canonico Carlo Stocchi. Seguendo una corrente d'aria "Vidi un'apertura sotto un masso calcareo lungo un metro e mezzo ed alto cinquanta centimetri e più. Di colà usciva una corrente non continua", si dà da fare per liberare il passaggio. Dopo essersi avventurato all'interno di un cunicolo arriva in una grotta concrezionata, dove al centro si trova un "cupo abisso", di cui vuole misurare la profondità gettandovi una pietra, che sente rimbalzare per alcuni secondi, un metodo ancora oggi usato dagli speleologi.

11 - Johann Jacob Volkmann "Historische-kritischen Nachrichten von Italien", Vol. III., Caspar Fritsch, Leipzig, 1770/71 - Traduzione Franco Dominijanni - www.archive.org

12 - Ant. Federico Büsching "Nuova Geografia" - tradotta in lingua toscana dall'Ab. Gaudioso Jagemann" - Tomo XXIV - Venezia 1778

13 - Immanuel Kant "Geografia Fisica" Tradotta dal tedesco" - Vol. IV - Milano 1809

14 - Vincenzo Tizzani "Una gita al Santuario di Loreto" - Salviucci - Roma 1880

Con una punta di rammarico chiude il racconto lamentando il fatto che dopo qualche mese dalla scoperta “*avendola visitata un cotale, ne fece egli in un pubblico foglio la descrizione, attribuendone a sé e non a me la scoperta*”.

Una certa fama internazionale però le grotte di Cesi dovevano ancora averla, se Adone Palmieri, medico militare e poligrafo, nella “*Topographia statistica dello Stato Pontificio*”¹⁵ nel 1859, descrivendo le meraviglie delle grotte, in particolare quella di casa Stocchi, “*lunga metri 96, e 30*”, afferma “*ch’ivi mostrano agl’Inglese, ai Dotti che vi scendono, tutta la bellezza e l’orrore della natura*”. Un altro intervento interessante si trova nel “*Dizionario di erudizione storico-ecclesiastica da S.Pietro sino ai nostri giorni*”, compilato dal Cav. Gaetano Moroni Romano e pubblicato nel 1854. Alla voce riguardante il distretto di Terni un’ampia sezione è dedicata a Cesi, dove vengono assemblate svariate notizie provenienti da varie fonti. Viene citata la conformazione a strati della montagna e la presenza di fossili marini, e viene data una descrizione di diverse morfologie di concrezione, alcuni “*lunghe cilindri bianchissimi pendono dall’alto delle cavità, e veggonsi come sorgere dal basso altri cilindri di maggior diametro*”, altre sono “*a guisa di veli, frangie, festoni ed altri bizzarri disegni*”, mentre “*le pareti sono intonacate tutte di sostanza calcarea, che penetrando dalle fenditure del monte hanno formato scherzi curiosissimi*”.¹⁶

Con il tempo poi la fama internazionale di Cesi si è persa nelle nebbie della memoria, e le “*prigioni dei venti*” hanno smesso di essere una tappa obbligata dei visitatori e studiosi stranieri che percorrevano la Via Flaminia tra Roma e Spoleto. Ma qualcosa nelle abitudini locali si è mantenuto se ancora oggi la funzione refrigerante delle correnti d’aria che escono dalle fessure nelle cantine dei palazzi di Cesi, viene sfruttata dagli abitanti che le utilizzano come un comodo “condizionatore” per refrigerare d’estate tutta la casa. Le abitazioni sono ancora le stesse dei tempi dei viaggiatori stranieri costruite sopra vere e proprie grotte, la più grande delle quali è Grotta Eolia, che deve essere sicuramente una di quelle descritte nei diari di viaggio, come testimoniano le numerose firme dell’epoca lasciate al suo interno, che si sviluppa per circa duecento metri con l’ingresso dai sotterranei di Palazzo Stocchi. Ma la fantasia popolare non ha limiti e parlando con qualche anziano del luogo è facile sentire raccontare di improbabili percorsi sotterranei che collegano zone distanti della montagna, suggestionati anche dalla presenza di importanti resti archeologici di epoca umbro-romana, che inducono facilmente a favoleggiare di misteri nascosti.

15 - Adone Palmieri “*Topographia statistica dello Stato Pontificio, ossia Breve descrizione delle città e paesi*” – Tipografia Forense – Roma 1859

16 - Gaetano Moroni Romani “*Dizionario di erudizione storico-ecclesiastica*” - Vol. LXIX – Venezia - 1854

2 - Inquadramento geografico, geologico, geomorfologico ed idrogeologico

L'area di studio si colloca nella parte meridionale dei Monti Martani, una dorsale, costituita da rocce calcaree, ad orientazione NW-SE. Dal punto di vista geografico essa ricade nelle CTR n. 335150-160 e nelle tavolette IGM 138 IV-NO (San Gemini) e 138 IV-NE (Cesi) (**Fig. 2.1**): le quote sono comprese tra i 430 m s.l.m. dell'abitato di Cesi (coordinate geografiche 42.608832, 12.585972) e i 1120 m s.l.m. del M. Torre Maggiore (coordinate geografiche 42.608832, 12.585972).

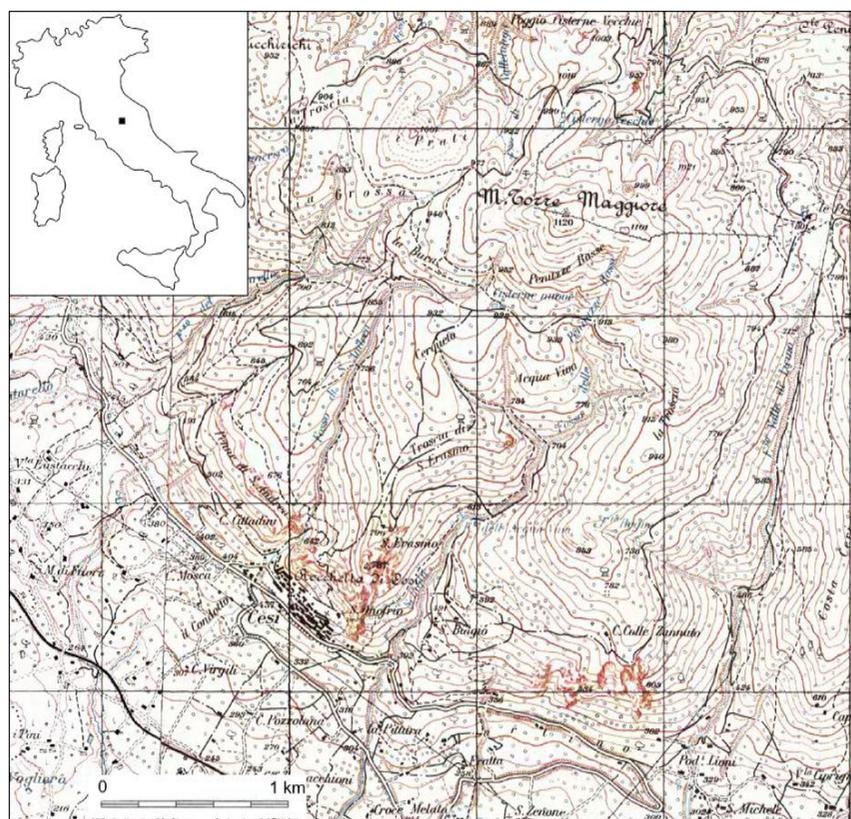


Fig. 2.1 - Localizzazione dell'area di studio su cartografia IGM, 138 IV-NO (San Gemini) e 138 IV-NE (Cesi).

Il paesaggio, di grande bellezza, è tipico degli ambienti montani dell'Appennino umbro-marchigiano con forme epigee (superficiali) ed ipogee (sotterranee) che danno al territorio un alto valore naturalistico ed ambientale (**Fig 2.2**) che si intreccia con il valore del patrimonio storico-culturale ed archeologico (Eremo di S. Erasmo, necropoli protostorica del Monte Torre Maggiore, ecc.).

Dal punto di vista geologico nell'area affiorano rocce appartenenti alla Serie umbro-marchigiana, una serie di rocce calcaree e calcareo-marnose deposte in ambiente marino durante le ere geologiche e poi emerse grazie ai fenomeni di compressione e sollevamento.

La **Fig. 2.3** riporta la carta geologica dell'area ottenuta dalla rielaborazione del dataset geologico in formato vettoriale della Regione Umbria (<http://umbriageo.regione.umbria.it/catalogostazioni/catalogo.asp>).

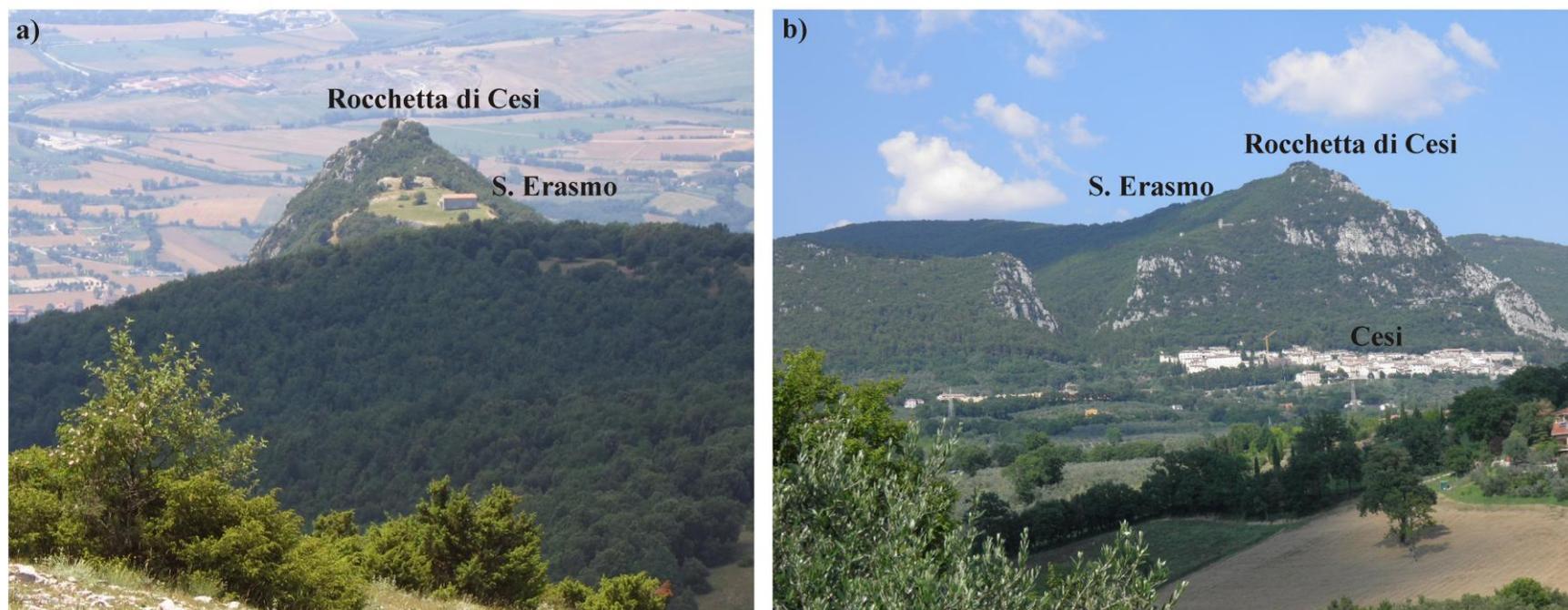


Fig. 2.2 – a) Panoramica dal Monte Torre Maggiore (si osserva in basso le Rocchette di Cesi con l’Eremo di S. Erasmo); b) Versante sud-occidentale della struttura con vista sull’abitato di Cesi (foto da SW scattata da San Gemini).

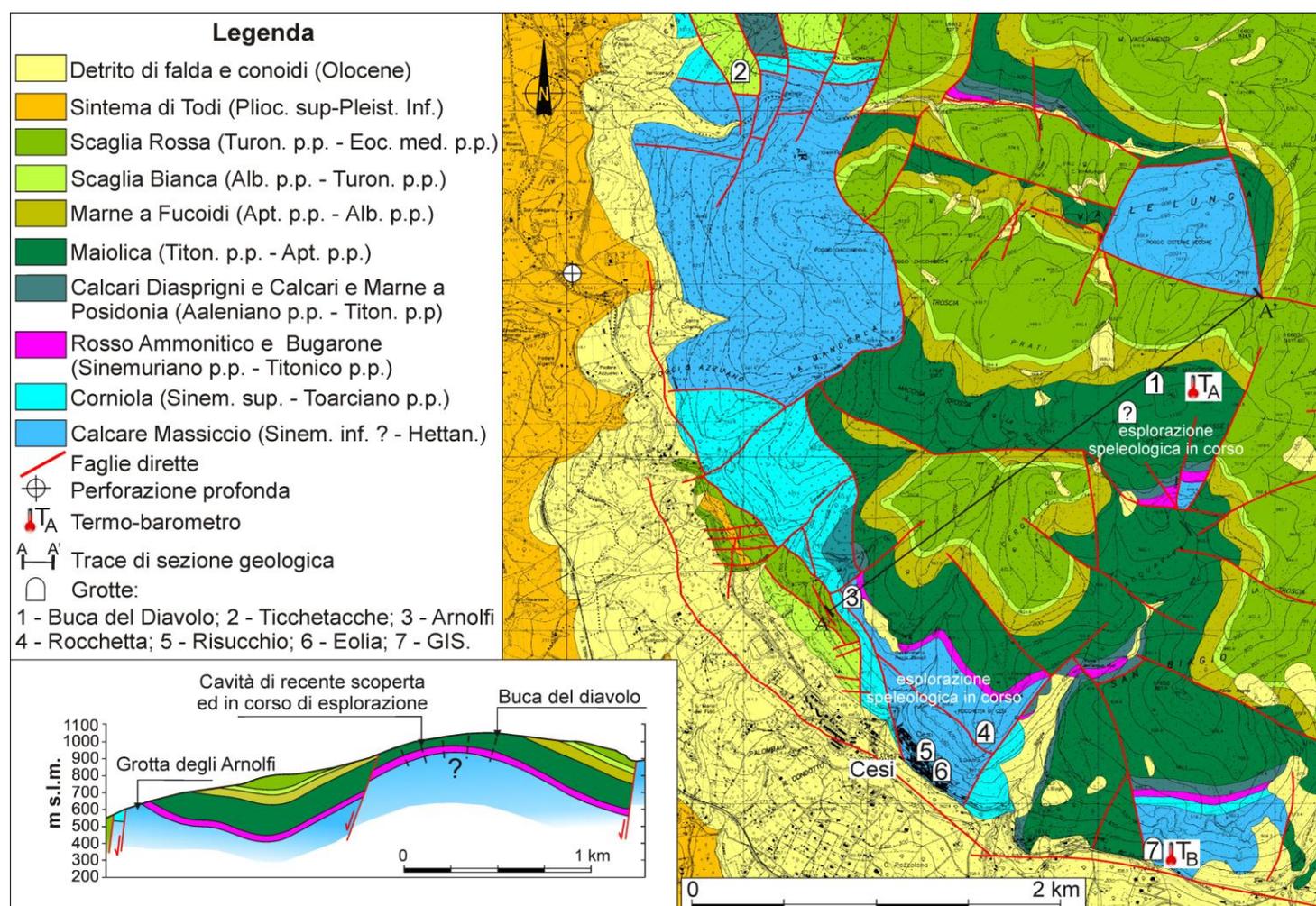


Fig. 2.3 – Carta geologica dell’area di Cesi. In basso a sinistra la sezione geologica orientata NE-SW. Ripresa e modificata da Di Matteo et al. (2014).

La formazione rocciosa più antica è quella del Calcarea Massiccio (**Fig. 2.4**) che compone il nucleo del Monte Torre Maggiore e che affiora lungo il versante sud-occidentale della struttura calcarea presso l'abitato di Cesi. Il Calcarea Massiccio è caratterizzato da banchi calcarei di colore bianco-nocciola di spessore superiore ai 2 m: si tratta di una roccia sedimentaria deposta nel Giurassico inferiore in un ambiente di piattaforma carbonatica, cioè di mare basso e calmo tipo le Bahamas attuali. Con il trascorrere del tempo geologico, questo ambiente deposizionale è stato dislocato e smembrato da faglie distensive che hanno dato origine ad aree ribassate e ad aree rialzate (chiamate alti strutturali). Queste differenze di profondità del mare hanno influenzato le caratteristiche e gli spessori dei sedimenti: nelle zone di alto si sono deposte delle rocce comunemente non presenti nelle zone ribassate. La zona di Cesi è caratterizzata da una tipica sedimentazione di alto strutturale (serie condensata - Piali, 1976): il Calcarea Massiccio, infatti, spostandosi da Cesi verso Torre Maggiore, lascia spazio ad una formazione chiamata Bugarone (calcarea nodulare di spessore di 10-50 m) che è tipica di un ambiente sedimentario di alto strutturale. Sopra il Bugarone si trova la Formazione della Maiolica, un calcarea bianco stratificato che affiora diffusamente sulla sommità del Monte Torre Maggiore (**Fig. 2.4**).

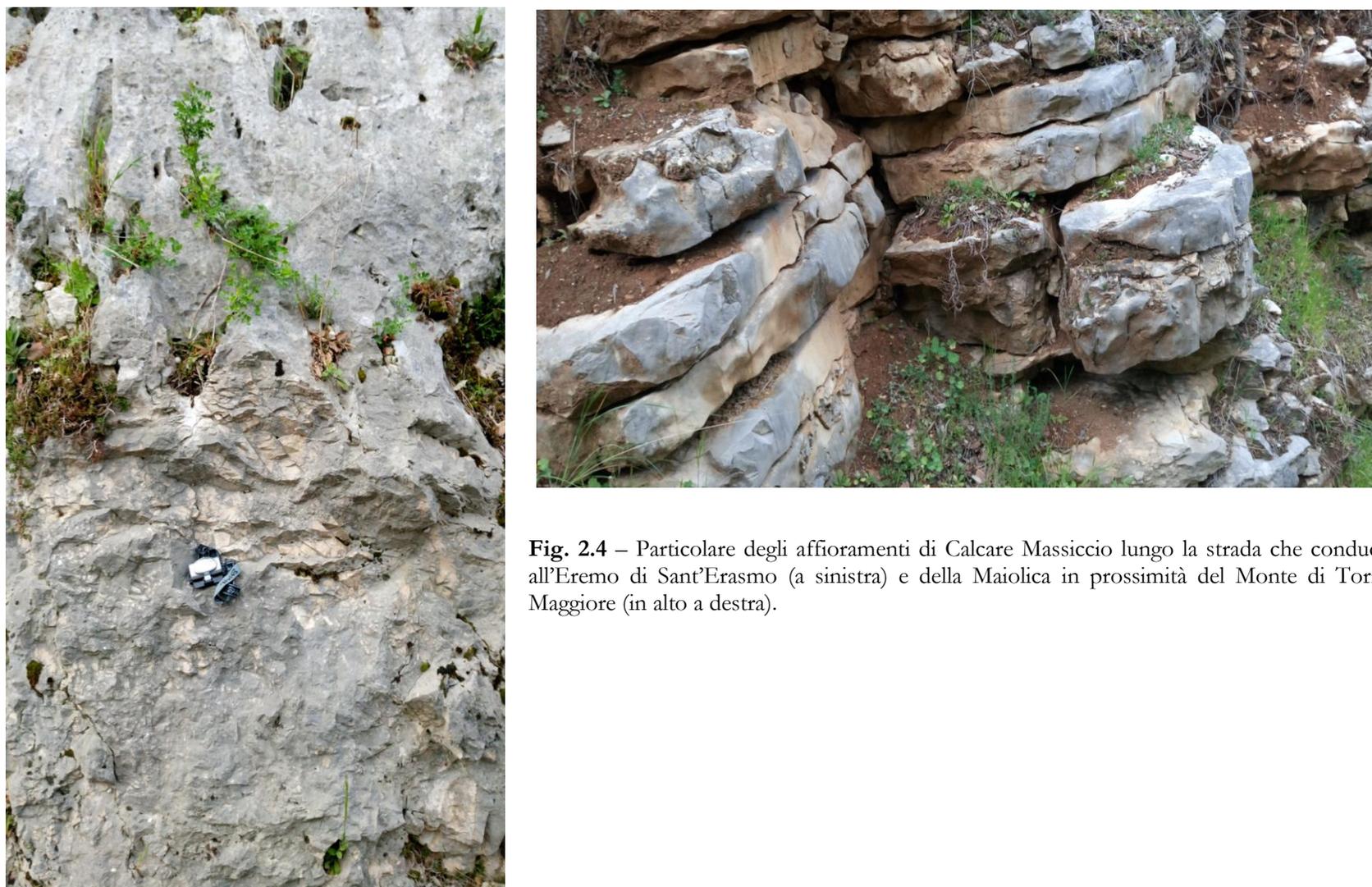


Fig. 2.4 – Particolare degli affioramenti di Calcarea Massiccio lungo la strada che conduce all'Eremo di Sant'Erasmus (a sinistra) e della Maiolica in prossimità del Monte di Torre Maggiore (in alto a destra).

La struttura carbonatica, a causa delle deformazioni tettoniche, è stata piegata ed il suo fianco occidentale è stato dislocato da un sistema di faglie dirette e transtensive conosciuto come “*faglia dei M. Martani*” (Brozzetti e Lavecchia, 1995). Questa, in prossimità dell’abitato di Cesi, subisce una variazione di direzione da NNW-SSE a NW-SE. Le grotte principali (es: grotta degli Arnolfi, grotta Eolia, grotta GIS) si sviluppano proprio lungo le direzioni delle fratture associate a questa importante linea tettonica. Dal punto di vista geomorfologico il versante di Cesi è stato da sempre interessato da fenomeni di crollo che hanno minacciato l’abitato. Questo è documentato sin dal 1600 e la storia recente indica che nel 1987 si è verificato il crollo di un blocco calcareo di circa 20-25 m³ che si è arrestato in prossimità del centro storico (comune.terni.it/comunicato_stamp.php?id=39246). A seguito di questi eventi sono stati eseguiti, negli ultimi anni, dei lavori di consolidamento del versante. Lungo tutto il versante sud-occidentale di Monte Torre Maggiore si rivengono grossi massi di Calcarea Massiccio crollati da le “*Penne di Sant’Andrea*” (vedi Fig. 2.1 per la localizzazione) e rotolati lungo il versante; inoltre accumuli detritici, contenenti blocchi da centimetrici a decimetrici, in cui si rivengono anche rocce carsificate contenenti concrezioni calcitiche, sono presenti lungo il Fosso di Sant’Andrea subito a nord-ovest dall’abitato di Cesi (**Fig. 2.5**). Tutto questo indica che nel corso dei secoli la morfologia del versante di Cesi è stata fortemente influenzata dai fenomeni gravitativi e i ripetuti crolli potrebbero aver sepolto o occluso gli ingressi delle numerose cavità che vengono citate dai documenti storici illustrati nel Capitolo 1.

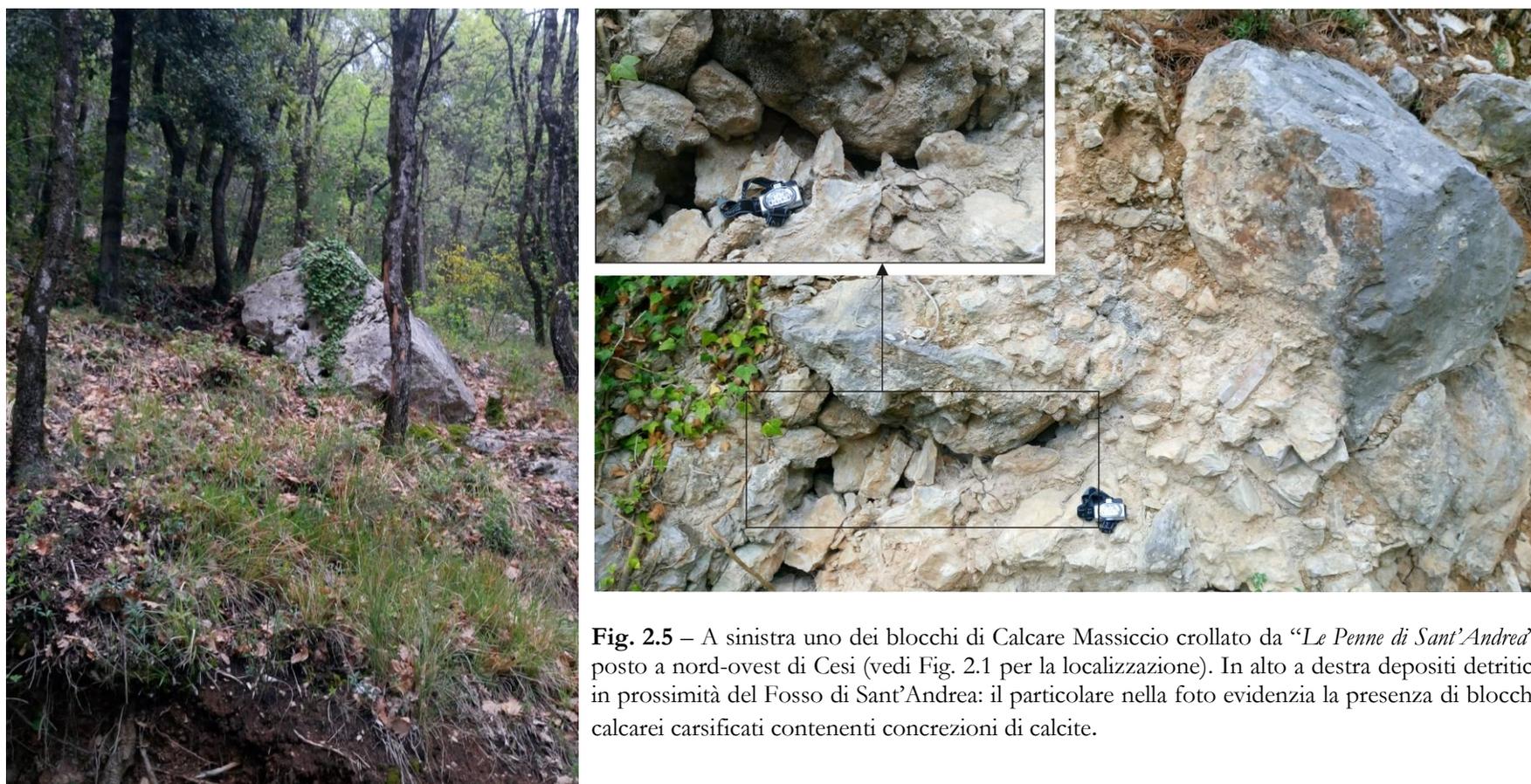


Fig. 2.5 – A sinistra uno dei blocchi di Calcarea Massiccio crollato da “*Le Penne di Sant’Andrea*” posto a nord-ovest di Cesi (vedi Fig. 2.1 per la localizzazione). In alto a destra depositi detritici in prossimità del Fosso di Sant’Andrea: il particolare nella foto evidenzia la presenza di blocchi calcarei carsificati contenenti concrezioni di calcite.

Dal punto di vista idrogeologico non si osservano emergenze di acqua intorno al massiccio calcareo che è bordato da depositi detritici e conoidi alluvionali che scendono entro la depressione tettonica della conca di Terni (Cattuto et al., 2002; Gregori, 2012). Dalle informazioni derivanti da una perforazione di circa 330 m nella zona di Carsule (ISPRA, 2012), risulta che il Calcarea Massiccio è completamente asciutto

indicando che la falda di base si trova a profondità superiori. Durante le fasi di scavo sono state incontrate due grosse cavità carsiche a 90 e a 270 m di profondità (comunicazione personale del geologo incaricato per l'esecuzione della perforazione) che confermano che il sistema carsico presenta dei livelli profondi. Da questo si può desumere che le grotte esaminate nel presente progetto appartengono alla parte superiore di un sistema carsico molto complesso ed articolato che si sviluppa per alcune centinaia di metri nel sottosuolo. Nel complesso le grotte, assieme alle fratture e al network di condotti carsici, rappresentano la via preferenziale di drenaggio delle acque di infiltrazione che contribuiscono, dopo lunghi percorsi, a ricaricare l'acquifero di base profondo che alimenta il gruppo sorgenzioso di Stifone-Nera Montoro (**Fig. 2.6**), posto a circa 10 km a SW di Cesi tra Narni e Nera Montoro (Di Matteo et al., 2009).

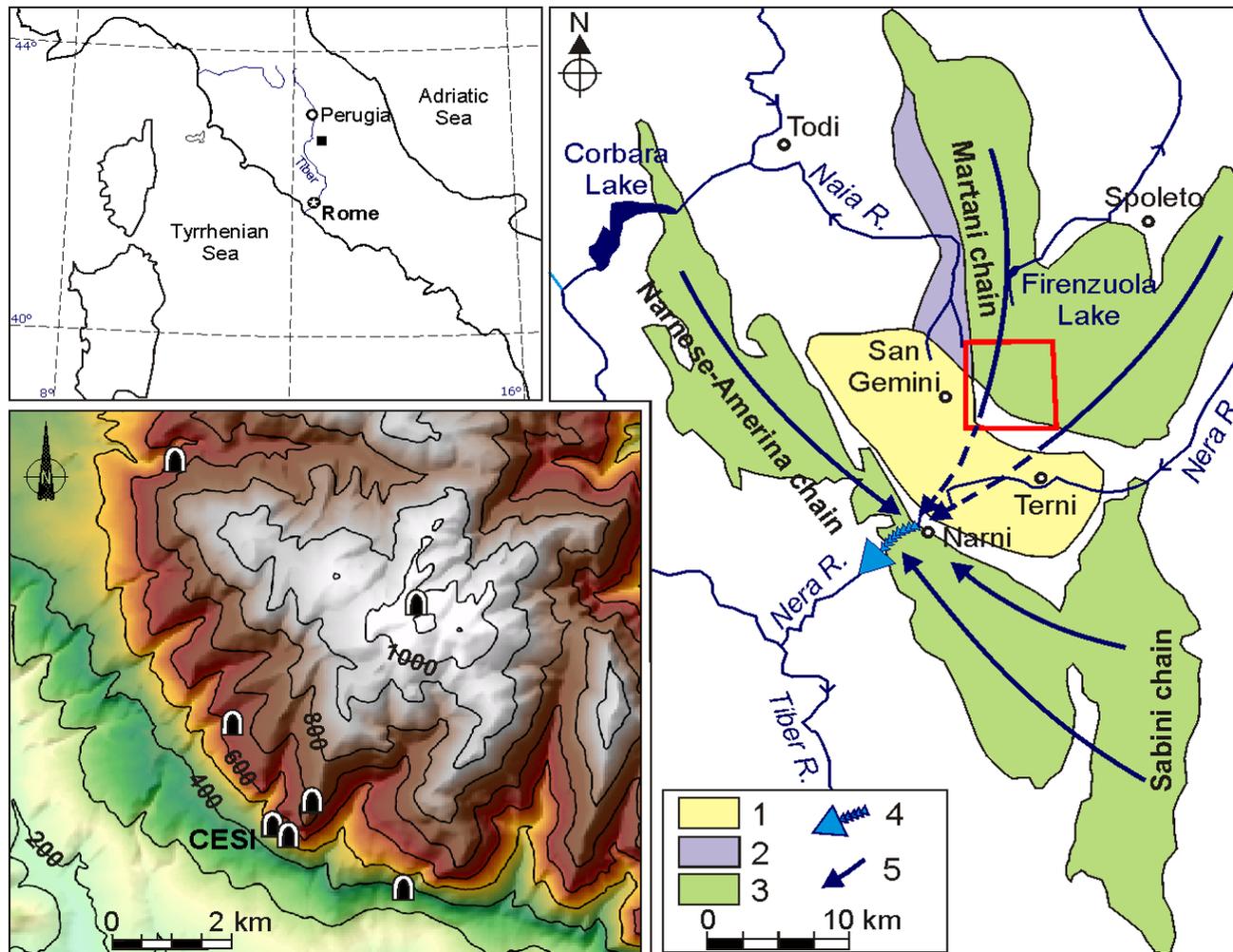


Fig. 2.6 - Sistema idrogeologico alimentante il gruppo sorgenzioso di Stifone-Nera-Montoro (ripreso e modificato da Di Matteo et al., 2016). Il quadrato rosso racchiude l'area di studio. 1 – dorsali carbonatiche; 2 – travertini; 3 – depositi alluvionali recenti ed antichi; 4 – sorgenti di Stifone-Nera Montoro; 5 – principali direttrici di flusso delle acque sotterranee.

3 - Le forme carsiche: genesi e processi

Di seguito si riportano alcuni cenni sulla genesi delle forme carsiche, tenendo conto anche delle caratteristiche geologico-strutturali delle rocce. Il carsismo dà origine a diverse forme ma, ad una prima analisi, queste si possono raggruppare in forme epigee (quando vengono interessate le rocce affioranti) e forme ipogee (quando vengono interessate le rocce in profondità). Non tutte le rocce sono soggette ai fenomeni carsici ma solo quelle idrosolubili, cioè quelle che possono essere attaccate dall'azione chimica dell'acqua. In altri termini vengono coinvolte solo le rocce che possono essere dissolte (es: le rocce calcaree costituite da carbonato di calcio). Nel carsismo classico (*epigenico*) il fenomeno procede dall'alto verso il basso. Le acque meteoriche diventano acidule grazie all'anidride carbonica (CO₂) presente nell'atmosfera e nei suoli: queste infiltrandosi nel sottosuolo aggrediscono le rocce calcaree mediante la reazione di dissoluzione chimica. L'acidità dell'acqua può aumentare a contatto col suolo grazie agli acidi umici presenti negli strati superficiali del suolo, quando presente. Nel sottosuolo l'azione dell'acqua amplia le fratture presenti nelle rocce agendo sia mediante corrosione chimica ma anche fisicamente, mediante i fenomeni di erosione provocati dal suo scorrimento. Il processo progredisce quindi verso profondità via via maggiori e si sviluppa nello spazio e nel tempo. In generale, alle nostre latitudini, i tassi di degradazione sono di circa 20-70 mm ogni 1000 anni (De Waele e Piccini, 2008), quindi per dare origine a cavità d'interesse speleologico è necessaria l'azione lenta e perdurante dell'acqua per diverse decine o centinaia di migliaia di anni. All'interno delle grotte spesso si rinvengono delle concrezioni prodotte dalla precipitazione del carbonato di calcio in precedenza preso in soluzione: queste si presentano sotto forme spettacolari quali stalattiti, stalagmiti, colonne, drappaggi, ecc. Le **Figg. 3.1** e **3.2** mostrano delle foto scattate all'interno di alcune cavità presenti nel massiccio calcareo di Cesi con dei particolari delle forme concrezionali.

Oltre al carsismo *epigenico* esiste un'altra tipologia di carsismo, quello *ipogenico*. In questo caso si tratta di un carsismo dal basso verso l'alto che avviene attraverso diversi meccanismi. Uno di questi è quello della risalita di fluidi aggressivi provenienti da fonti profonde (ricchi per esempio di CO₂ e di acido solfidrico - H₂S): questi, tramite delle vie preferenziali (faglie e sistemi di fratture), entrano in contatto con le rocce calcaree esercitando la loro azione di dissoluzione. In questo caso le forme presenti all'interno delle cavità sono molto diverse da quelle prodotte dal carsismo classico ed inoltre si possono rinvenire dei depositi chimici come il gesso ed altri minerali. Per approfondimenti sulla speleogenesi e morfologie carsiche si rimanda a De Waele e Piccini (2008).



Fig. 3.1 - Concrezioni all'interno di Grotta degli Arnolfi.

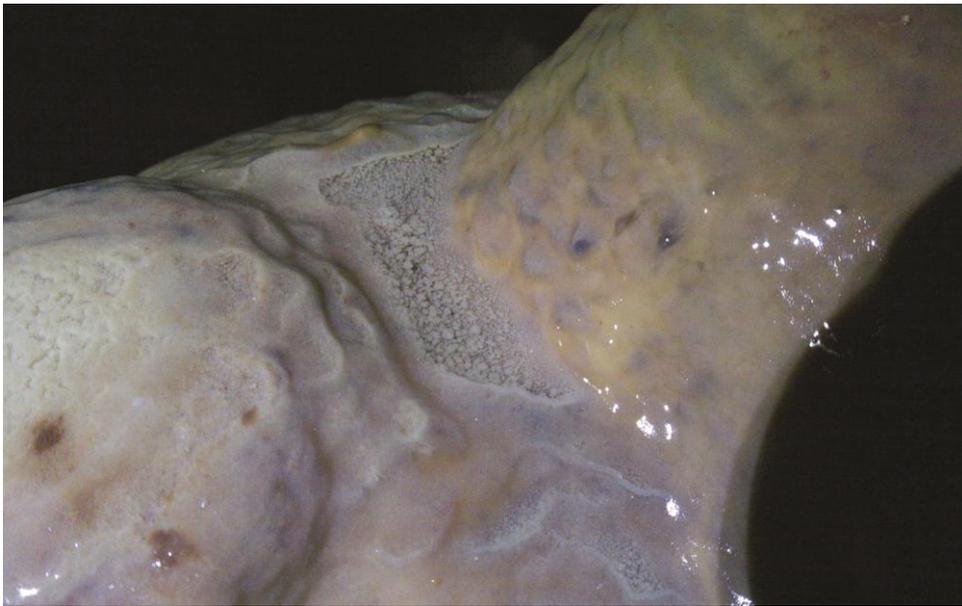
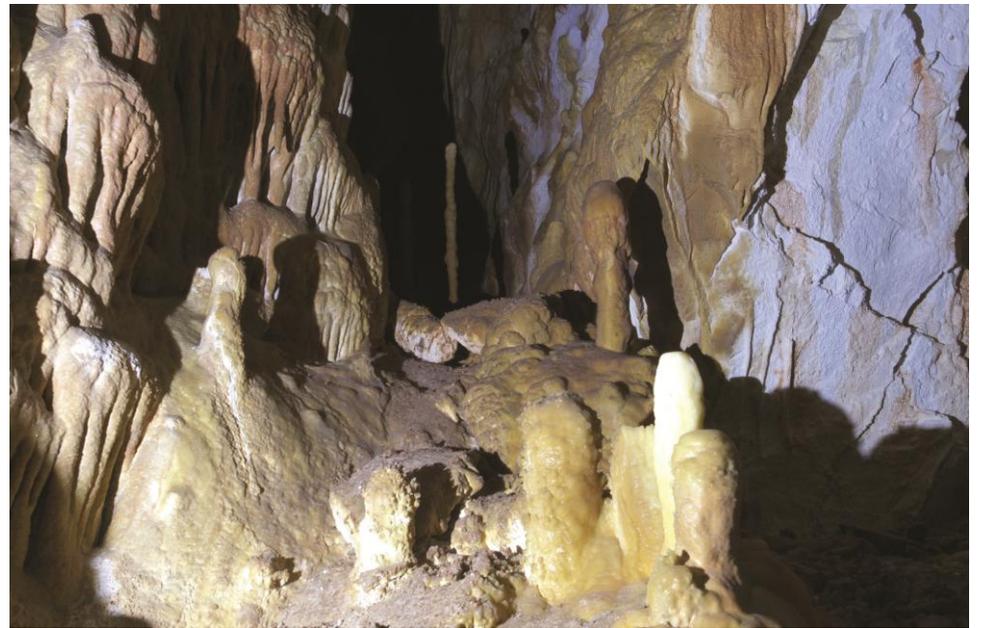


Fig. 3.2 - Concrezioni all'interno di Grotta GIS.

4 - La circolazione d'aria nelle grotte: stato delle conoscenze

Lo studio della circolazione d'aria nelle grotte rappresenta, ai fini dell'esplorazione speleologica, un utile strumento per l'individuazione delle probabili direzioni di prosecuzione delle cavità, spesso mascherate o ostruite da crolli. Diversi studi in letteratura hanno investigato la circolazione d'aria negli ambienti ipogei prendendo in esame diversi aspetti quali le variazioni di densità dell'aria, le variazioni barometriche, la geometria del sistema carsico, ecc. (Trombe, 1952; Cigna, 1971; Lismonde, 1981; De Freitas et al., 1982; Atkinson et al., 1983; Villar et al., 1984; Choppy, 1986; Cigna and Forti, 1986; Smithson, 1991; Castellani e Dragoni, 1986-1987; Dragoni e Verdacchi, 1993; Badino, 1995; Cigna, 2002; Menichetti e Tosti, 2008; Pflitsch et al., 2010).

In accordo con le classificazioni storiche (Geiger, 1966; Bögli, 1978), basate sulle modalità di ventilazione delle grotte, si distinguono:

- grotte caratterizzate da un ingresso singolo;
- grotte caratterizzate da un sistema multiplo di ingressi.

Molto interessante è il secondo caso cioè quando più grotte, poste a quote anche molto diverse tra loro, sono interconnesse (**Fig. 4.1**).

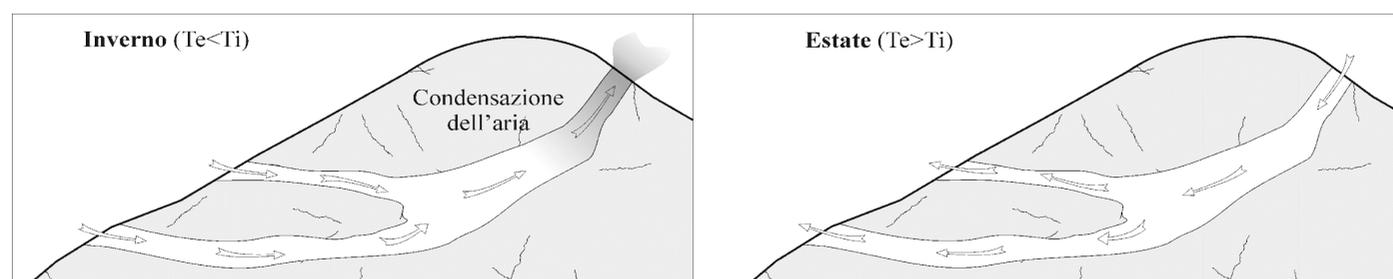


Fig. 4.1 – Schematizzazione della circolazione d'aria in un sistema di cavità interconnesse durante i mesi invernali e quelli estivi.

Come mostrato nella **Fig. 4.1** le cavità aspirano o espellono aria (soffiano) durante le stagioni: in dettaglio, nell'area appenninica dell'Italia centrale, le inversioni delle correnti d'aria si innescano in concomitanza delle principali inversioni termiche che, si verificano principalmente a fine inverno/inizio primavera e a fine estate/inizio autunno.

Vari sono i meccanismi che causano la circolazione dell'aria negli ambienti sotterranei: principalmente (ma non solo) questi sono legati alla differenza di densità delle masse d'aria che si muovono in accordo con la legge di Archimede. Di seguito si riportano due dei meccanismi responsabili della circolazione d'aria nelle grotte:

- a) se la pressione barometrica dell'aria all'esterno della grotta è più alta di quella interna, o viceversa, le masse d'aria si spostano verso la zona con pressione più bassa. La variazione della pressione barometrica all'esterno di una grotta può quindi invertire il flusso d'aria in una cavità. Questo effetto, essendo rapido, è difficilmente misurabile nella maggior parte delle grotte (Pflitsch et al., 2010);
- b) le differenze di densità dell'aria (tra atmosfera esterna ed ambiente interno alle grotte) generano lo spostamento delle masse d'aria. Queste differenze di densità dell'aria, che sono legate anche alle differenze termiche tra esterno (T_e) ed interno alla grotta (T_i), producono delle differenze di pressione, conosciute in letteratura come pressione motrice, ΔP_m . La ΔP_m non va quindi confusa con la variazione della pressione atmosferica dell'aria.

Nei grandi sistemi carsici la ventilazione nelle grotte è in prevalenza regolata dal meccanismo b). Nei casi più semplici (es: due cavità poste a quote diverse e collegate tra loro) la *pressione motrice* (ΔP_m) può essere approssimata dall'eq. 1 (Trombe, 1952; Lismonde, 1981).

$$\Delta P_m \approx \frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{T_0} \cdot \left(T_i - \frac{T_A + T_B}{2} \right) \quad (1)$$

dove:

ΔP_m = pressione motrice che regola la circolazione d'aria (Pa);

ρ_0 = densità media dell'aria nella cavità (kg/m³);

g = accelerazione di gravità (m/s²);

h = differenza di quota tra l'ingresso alto e quello basso (m);

$T_0 = 273$ °K;

T_i = temperatura media all'interno del sistema carsico (°K);

T_A = temperatura esterna della cavità alta (°K);

T_B = temperatura esterna della cavità bassa (°K).

Dall'eq.1 si evince come la *pressione motrice* si annulli quando la temperatura media dell'aria esterna al sistema carsico $[(T_A+T_B)/2]$ è uguale a quella interna T_i o nel caso di $T_i=T_A=T_B$. L'annullamento di ΔP_m fa cessare la ventilazione nella grotta: questo fenomeno può avvenire in qualsiasi momento dell'anno ma si osserva spesso durante i periodi di inversione termica.

In generale il flusso dell'aria in uscita da un condotto carsico (q_m) ha un moto turbolento che, in accordo con l'equazione di Darcy-Weisbach (eq. 2, da Jeannin, 2001), dipende da ΔP_m e R (resistenza cinetica del condotto o *aeraulic resistance*, kg⁻¹ m⁻¹), quest'ultima esprime le perdite di carico che si verificano in modo naturale nel condotto.

$$q_m = \sqrt{\frac{|\Delta P_m|}{R}} \quad (2)$$

Le perdite di carico riflettono la complessità del condotto carsico e dipendono dalla rugosità delle pareti, dalla presenza di slarghi e restringimenti repentini, ecc. (Badino, 1995). In generale prendendo come riferimento un condotto di 1 m di diametro, R varia tra 0.01 e 0.5 kg⁻¹ m⁻¹ (Luetscher e Jeannin, 2004). In altri termini al crescere di ΔP_m non è detto che cresca la velocità del flusso in uscita in quanto il risultato finale dipende molto dalle perdite di carico e quindi dalla complessità del sistema. Nel complesso il movimento dell'aria in ogni punto della grotta contiene, in linea di principio, tutte le informazioni sulla struttura nel suo insieme (Badino, 2008), spesso decifrabili anche analizzando lo spettro di oscillazione del flusso d'aria (cfr. Plummer, 1969; Badino, 1995). Nei prossimi Capitoli verrà illustrato il sistema di monitoraggio messo in opera in alcune cavità selezionate del massiccio calcareo di Cesi e verranno illustrati e discussi i primi risultati ottenuti, prendendo in esame anche l'assetto geologico-strutturale ed idrogeologico.

5 - Le grotte del massiccio di Cesi

La zona del massiccio di Cesi è caratterizzata dalla presenza di numerose cavità conosciute, molte delle quali si trovano all'interno dello stesso abitato, con accessi nelle cantine che si appoggiano direttamente alla roccia. Queste ultime sono state escluse dal presente lavoro in quanto il loro clima è influenzato inevitabilmente dalle attività antropiche. Per il monitoraggio termo-igrometrico sono state selezionate cinque grotte, le cui dimensioni variano da pochi metri a qualche centinaio di metri (**Fig. 5.1**). Trattandosi di un primo approccio alla conoscenza della meteorologia degli ambienti ipogei si è deciso di concentrarsi, ottimizzando le risorse a disposizione, su alcune cavità selezionate sulla base dell'assetto geologico-strutturale del sistema. Queste sono tutte caratterizzate da presenza di circolazione d'aria ma, dalle osservazioni occasionali, per le due localizzate in alto (Buca del Diavolo e Grotta della Rocchetta) è ipotizzabile un comportamento tipico degli ingressi alti (flusso in uscita in inverno, flusso in entrata in estate), mentre per le altre tre (quelle poste alla base del massiccio; Grotta degli Arnolfi, Risucchio e Grotta Gis), viceversa, è ipotizzabile un comportamento tipico degli ingressi bassi (flusso in uscita in estate e flusso in entrata in inverno).

Di seguito vengono presentate in dettaglio le grotte scelte per il monitoraggio.

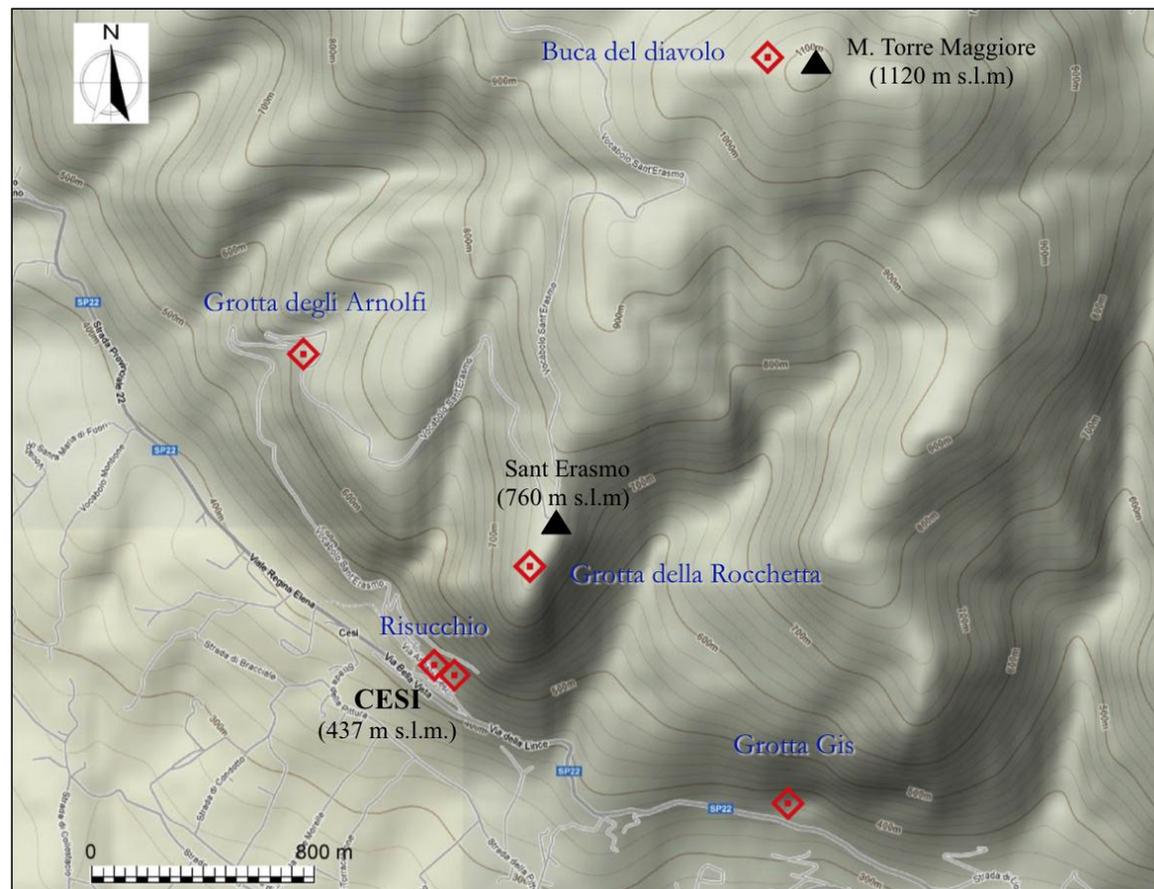


Fig. 5.1 – Localizzazione delle grotte scelte per il monitoraggio termo-igrometrico in continuo.

Buca del Diavolo

Si trova a ridosso della cima del Monte Torre Maggiore, a 1114 m.s.l., sul versante nord della montagna. Si tratta di una piccola cavità, con uno sviluppo di pochi metri ad andamento orizzontale (**Fig. 5.2**).



Fig. 5.2 - Ingresso di Buca del Diavolo.

Grotta delle Rocchette

La Grotta della Rocchetta si trova sul monte Eolo a sud-est rispetto al pianoro di Sant'Erasmus a 745 m.s.l. È una frattura verticale che scende per una decina di metri e poi si sviluppa in orizzontale per circa 20 metri (**Fig. 5.3**).



Fig. 5.3 - Ingresso di Grotta della Rocchetta.

Grotta degli Arnolfi

Si trova all'incirca a metà strada tra Cesi e la località Tiro a Volo a 600 msl, sul versante sud-occidentale della montagna. Si tratta di una cavità più complessa ed articolata rispetto alle precedenti. dopo uno stretto cunicolo iniziale si entra in una sala concrezionata, sul cui fondo si trova una frana (**Fig. 5.4**). Al di là della frana è tuttora in corso l'esplorazione, in quanto è stato scoperto un passaggio molto stretto in una zona abbastanza pericolosa, trovandosi in una zona di frana recente, che però ha portato alla scoperta di una sala piuttosto ampia e molto concrezionata, che potrebbe portare ad ulteriori scoperte.



Fig. 5.4 - Ingresso di Grotta degli Arnolfi.

Grotta del Risucchio

Si trova appena sopra l'abitato di Cesi a 460 msl, nei pressi dell'antica chiesa di Sant'Onofrio. La cavità è di modeste dimensioni ed è formata da un breve cunicolo orizzontale affiancato da un ambiente più vasto (**Fig. 5.5**). Data la posizione, a ridosso delle abitazioni potrebbe essere una delle bocche soffianti, utilizzate per opere di canalizzazioni dell'aria, descritte da Kircher e dagli altri viaggiatori di cui al Cap. 1.



Fig. 5.5 - Ingresso di Grotta del Risucchio

Grotta Gis

L'ingresso di Grotta Gis si trova all'interno della ex cava sulla strada S.P. 22 per Cesi a 356 msl. Gli scavi della cava hanno intaccato una parte della grotta e liberato l'attuale ingresso, che è stato rinvenuto casualmente nel 2002, dopo parecchi anni che la cava era stata dismessa. È la grotta più importante della zona, con uno sviluppo di circa 500m. , e presenta all'interno un'alternanza di sale concrezionate e gallerie in zone franose (**Fig. 5.6**).



Fig. 5.6 - Ingresso di Grotta Gis.

Un'altra grotta di grande interesse, sia per le dimensioni che per la presenza di forti circolazioni d'aria è **Grotta Eolia**, che però, a causa della sua posizione non è stata inclusa nel monitoraggio. L'ingresso si apre infatti all'interno del seminterrato di un palazzo storico di Cesi, palazzo Stocchi, seminterrato che attualmente ospita la sede il gruppo speleologico locale. Sul pavimento di questi locali si apre una botola che immette in un cunicolo scavato artificialmente, che porta dopo una cinquantina di metri alla grotta vera e propria. Le circolazioni d'aria e la temperatura interna sono quindi influenzate dall'apertura e chiusura di porte e finestre, dall'uso del riscaldamento nei mesi invernali, dall'afflusso di visitatori in alcuni periodi, visto che la grotta in parte è turistica, per cui non è stato ritenuto opportuno prenderla in considerazione, malgrado rivesta sicuramente una certa importanza, sia come possibilità esplorative, sia come testimonianza storica, per le firme che i visitatori del passato lasciavano sulle sue pareti.



Fig. 5.7 – Interno di Grotta Eolia

6 - Il monitoraggio delle grotte del massiccio di Cesi

6.1 Premessa

Le grotte sono ambienti chiusi in cui gli unici contatti con l'esterno avvengono attraverso gli stretti ingressi. La temperatura al loro interno dipende dalla loro posizione geografica (latitudine e altezza sul livello del mare) ed è all'incirca pari alla temperatura esterna media del luogo dove sono situate.

Nelle grotte della zona di Cesi, oggetto del presente studio, la temperatura rilevata in misurazioni occasionali fatte in passato dagli scriventi è stata di circa di 11-12 °C. Soprattutto durante le stagioni estreme (estate e inverno) era evidente una presenza di forti circolazioni d'aria, con una direzionalità che faceva ipotizzare il comportamento tipico delle grotte con almeno due ingressi. Nel caso specifico Buca del Diavolo e Grotta della Rocchetta apparivano avere il comportamento tipico degli ingressi alti (flusso in uscita in inverno e flusso in entrata in estate), mentre Grotta degli Arnolfi, Grotta del Risucchio e Grotta Gis avevano il comportamento inverso, da ingressi bassi, cioè flusso d'aria in uscita d'estate e in entrata d'inverno.

Essendo queste frutto di osservazioni occasionali non era possibile dedurre in maniera certa quello fosse il comportamento tipico delle grotte studiate, per questo si è deciso di condurre una campagna di rilevamento strutturata, in maniera di avere dati sul comportamento dei flussi d'aria delle grotte che coprissero almeno un anno, comprendendo così anche i momenti dell'inversione del flusso, i momenti cioè in cui l'aria, al variare stagionale della temperatura esterna, cambia direzione.

6.2 Strumenti per il monitoraggio termo-igrometrico

Per il monitoraggio di temperatura ed umidità dell'aria all'interno delle grotte, la velocità del vento e la temperatura e pressione atmosferica all'esterno sono stati usati i seguenti strumenti (**Figg. 6.1 – 6.2**):

- Temperatura e umidità relativa nelle grotte: termo-igrometro Datalogger Voltcraft DL-121TH con interfaccia USB, range della temperatura: da -40 a +70 °C, accuratezza temperatura: ± 1 °C, accuratezza umidità relativa $\pm 3\%$, risoluzione temperatura 0,1 °C, risoluzione umidità relativa 0,1%. Questi strumenti sono in grado di memorizzare fino a 16.000 misure di temperatura ed umidità ad intervalli stabiliti dall'utilizzatore;
- Monitoraggio velocità e temperatura dell'aria: anemometro Sentry datalogger ST732 anemometro a filo caldo per le misure puntuali e per i monitoraggi giornalieri, intervallo di velocità dell'aria: da 0,00 a 40,00 m/s, risoluzione: 0,01 m/s, accuratezza: 0,03 m/s+3% della lettura;
- Monitoraggio temperatura esterna e pressione atmosferica: stazione termobarometrica data recorder Lutron MHB-382SD, Microstazione Termobarometrica datalogger Voltcraft DL-181THP con interfaccia USB, precisione umidità $\pm 3,5\%$, precisione temperatura ± 1 °C, precisione pressione atmosferica $\pm 2,5$ hPa.



Fig. 6.1 – Particolari degli strumenti (in alto i termo-igrometri USB).



Fig. 6.2 – Particolari del posizionamento dei termo-barometri.

6.2.1 Monitoraggio termo-igrometrico

I termo-igrometri sono stati posizionati all'interno delle grotte a Novembre del 2014 e sono stati ritirati tra dicembre 2015 e gennaio 2016. Sono stati programmati per registrare quattro misure giornaliere ad intervalli di 6 ore.

Tutte le grotte scelte per il monitoraggio sono state ritenute interessanti in quanto caratterizzate da circolazioni d'aria piuttosto intense, anche nel caso di cavità di modeste dimensioni, che come indicato nel Capitolo precedente è considerato un probabile indizio di un sistema di cavità più ampio.

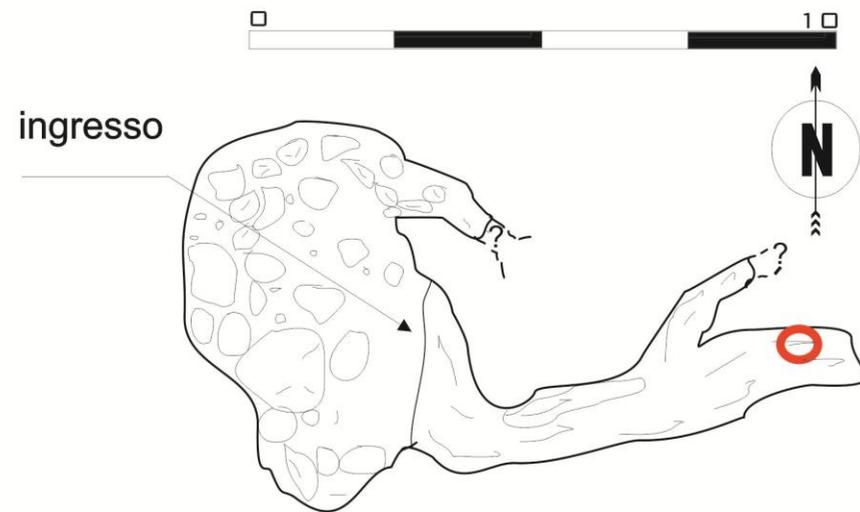
Nelle **Figg. 6.3A** e **6.3B**, sono riportate le piante delle grotte con l'indicazione della posizione dove sono stati collocati i termo-igrometri, in siti riparati dallo stillicidio dell'acqua, che avrebbe compromesso il funzionamento degli strumenti.

Per avere un riscontro con l'ambiente esterno, nello stesso periodo sono stati collocati due termobarometri per il monitoraggio della temperatura esterna e della pressione atmosferica. Uno strumento è stato collocato presso la cavità posta alla maggiore altitudine (Buca del Diavolo), mentre l'altro presso la cavità più bassa (Grotta Gis). Sono stati inseriti all'interno di cassette ventilate, ad adeguata distanza dal suolo e lontane da possibili fonti di disturbo delle misure. Analogamente ai termo-igrometri anche i termobarometri sono stati programmati per registrare quattro misure giornaliere.

Nel corso dell'anno sono stati fatti alcuni sopralluoghi per controllare il corretto funzionamento dei datalogger, considerando le difficili condizioni ambientali in cui si trovavano ad operare. In effetti degli otto strumenti due non hanno funzionato per tutto il periodo, interrompendo la registrazione prima della fine del monitoraggio. I due termo-igrometri in questione erano comunque accoppiati con altri che hanno registrato correttamente i dati e quindi il monitoraggio non ha subito danni. Uno dei termo-igrometri malfunzionanti era collocato a Grotta Gis (quello posto a maggior profondità), mentre l'altro era collocato a Grotta della Rocchetta (ha mostrato segni di ossidazione sull'interfaccia USB).

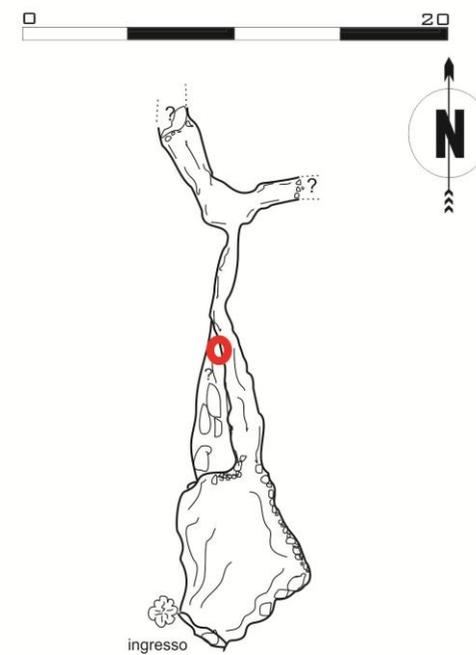
Buca del Diavolo

M.te Torre Maggiore, Cesi (Terni)



Grotta delle Rocchette

S. Erasmo, Cesi (Terni)



Grotta degli Arnolfi

Cesi (Terni)

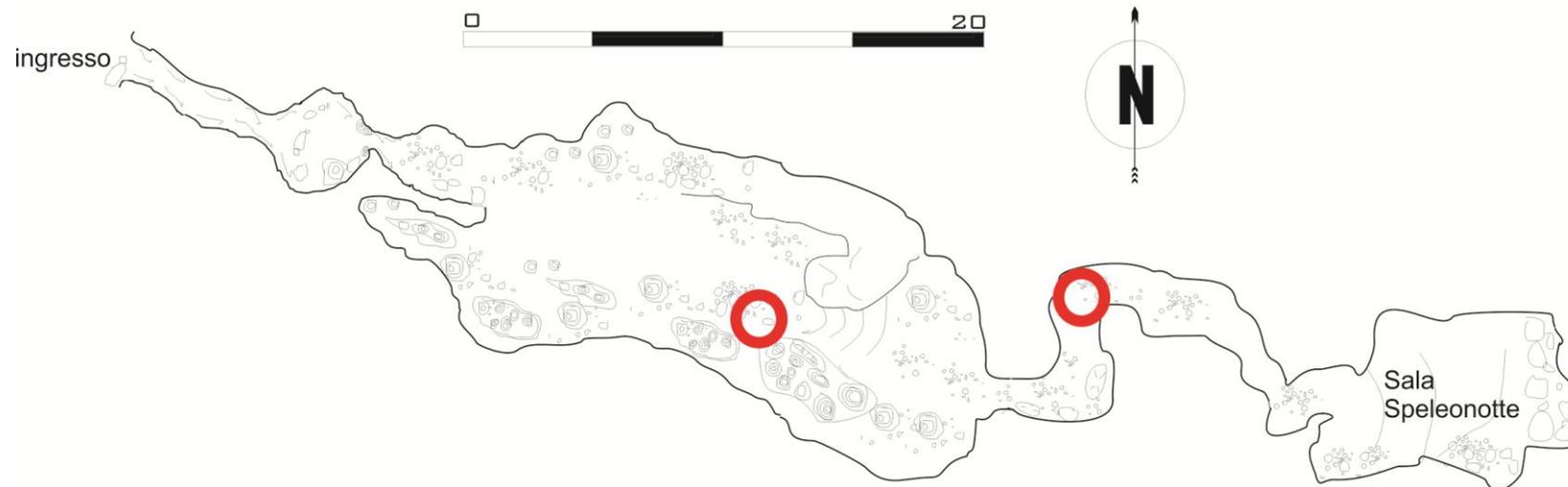
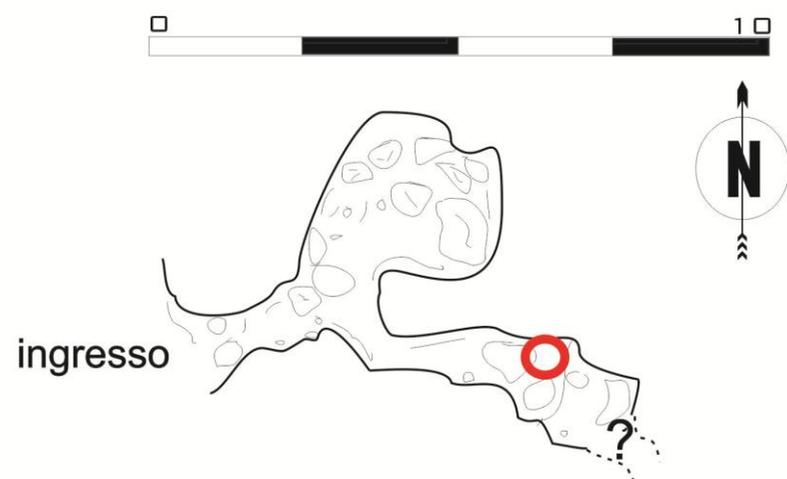


Fig. 6.3 A - Posizione dei termo-igrometri all'interno delle grotte

Grotta del Risucchio

Cesi (Terni)



Grotta Gis

Ex Cava S.Pellegrino - Cesi (Terni)

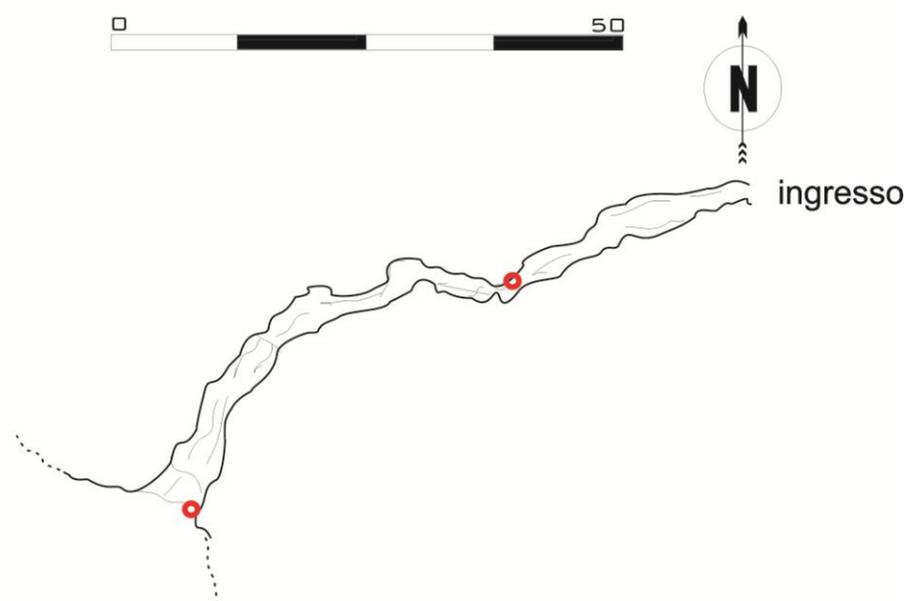


Fig. 6.3 B - Posizione dei termo-igrometri all'interno delle grotte

6.3 – Strumenti per la misura della velocità del flusso d'aria

Oltre alle misure termo-igrometriche sono state eseguite delle misure saltuarie della velocità del flusso d'aria (misure anemometriche) di alcune grotte selezionate mediante uno anemometro a filo caldo, modello SENTRY ST-732, velocità dell'aria: 0~40m/s, accuratezza ± 0.03 m/s. Al fine di avere delle misure accurate si è proceduto prima di tutto a ricostruire le sezioni degli ingressi delle cavità con una livella laser: le superfici sono state discretizzate in sottoaree in modo da poter ragguagliare le misure e trasformare le velocità in portate (**Fig. 6.4**).

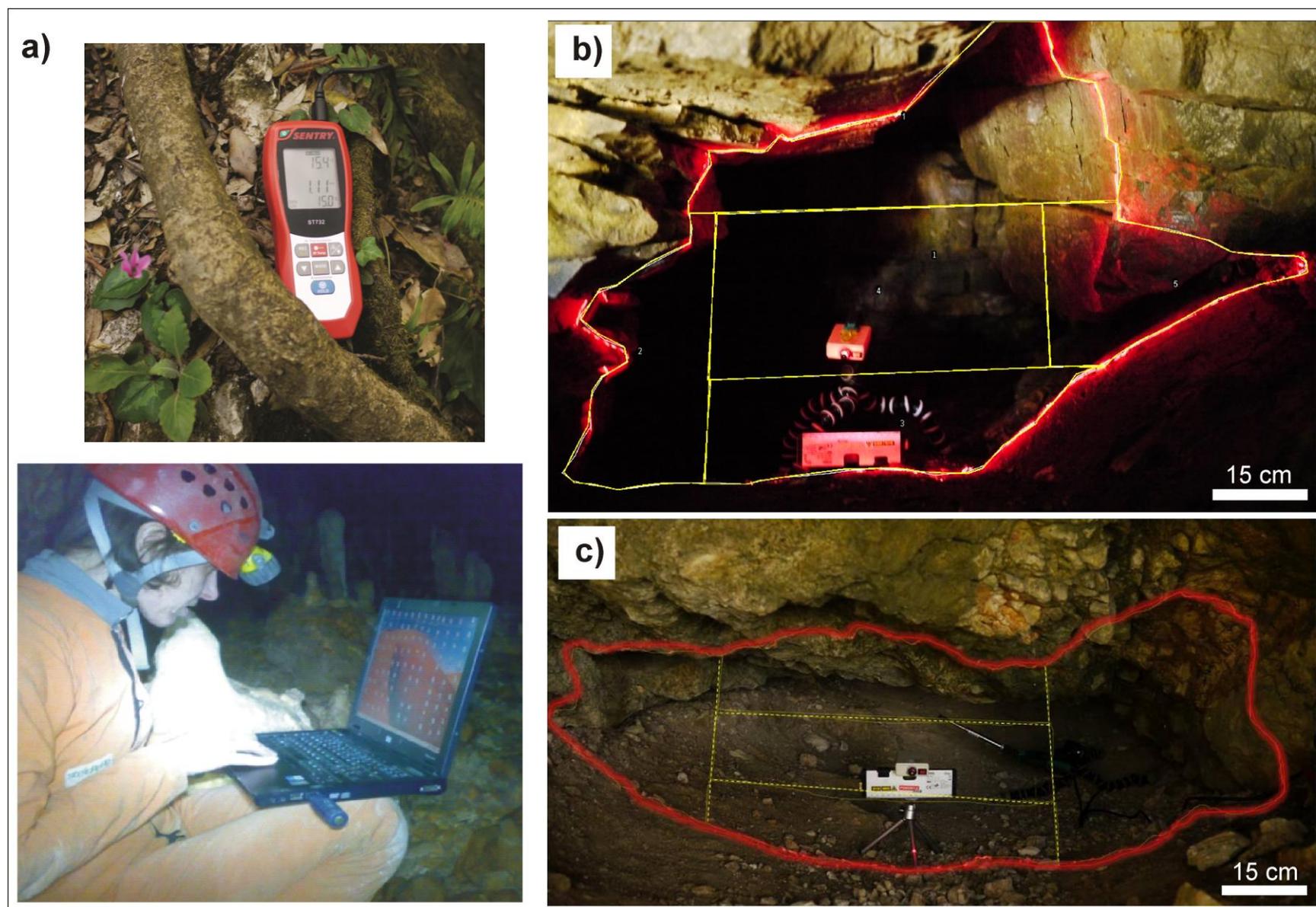


Fig. 6.4 – Anemometro a filo caldo per la misura della velocità del flusso d'aria dalle grotte (SENTRY ST-732) a), e ricostruzione della sezione per la misura della velocità del flusso d'aria mediante livella laser per la Buca del Diavolo b) e per la grotta degli Arnolfi c).

La **Fig. 6.5** illustra alcune fasi di misura per la Grotta della Rocchetta e Grotta degli Arnolfi.



Fig. 6.5 – Operazioni di misura della velocità del flusso d'aria presso Grotta della Rocchetta e Grotta degli Arnolfi.

6.3.1 - Monitoraggi anemometrici

I monitoraggi sono stati effettuati all'imbocco di alcune delle grotte per tentare di individuare comportamenti riconoscibili e peculiari, che possano fornire informazioni sulla struttura della grotta interna.

Il monitoraggio anemometrico presenta difficoltà tecniche più severe rispetto a quelle termo-igrometriche: lo strumento deve essere posizionato in modo da monitorare il flusso in uscita o in ingresso della grotta e la misura può essere soggetta ai fenomeni meteorologici. Inoltre il filo caldo, principio di funzionamento dell'anemometro utilizzato, se da un lato rende ottimale la sensibilità dello strumento, dall'altro lo rende particolarmente vulnerabile a fenomeni come la condensa o lo stillicidio. Anche il consumo energetico è piuttosto sostenuto, per cui un altro limite è la durata delle batterie. L'insieme di questi fattori fa sì che i monitoraggi non possono essere condotti per più di 1 o 2 giorni. Il primo di questi monitoraggi è stato condotto all'imbocco di grotta degli Arnolfi, dalle 10.35 del 9 agosto 2015 alle 11.17 del 10 agosto 2015, con intervallo di registrazione di 1 minuto. In questo periodo il comportamento di grotta degli Arnolfi era quello tipico di un ingresso basso, cioè con il flusso d'aria in uscita. In **Fig. 6.5** viene riportata la velocità dell'aria in metri al secondo e la temperatura dell'aria in gradi centigradi. Si osserva un comportamento apparentemente strano dell'andamento di temperatura e velocità. Infatti vediamo come la temperatura, che si mantiene quasi sempre intorno a 10° C, in alcuni momenti, intorno alle 16.30, alle 17.30 ed alle 19.30 sale in maniera sensibile per poi ritornare su valori soliti. La velocità dell'aria ha un andamento complementare, con brusche diminuzioni negli stessi momenti. Si consideri che la zona è stata investita nelle stesse ore da un veloce temporale estivo, in una situazione meteorologica assai calda, per cui si può ritenere che il comportamento sia da attribuire alla brusca variazione barometrica verificatasi all'esterno, che ha fatto interrompere momentaneamente il flusso dell'aria, che quindi risultava più calda in quanto proveniente dall'esterno.

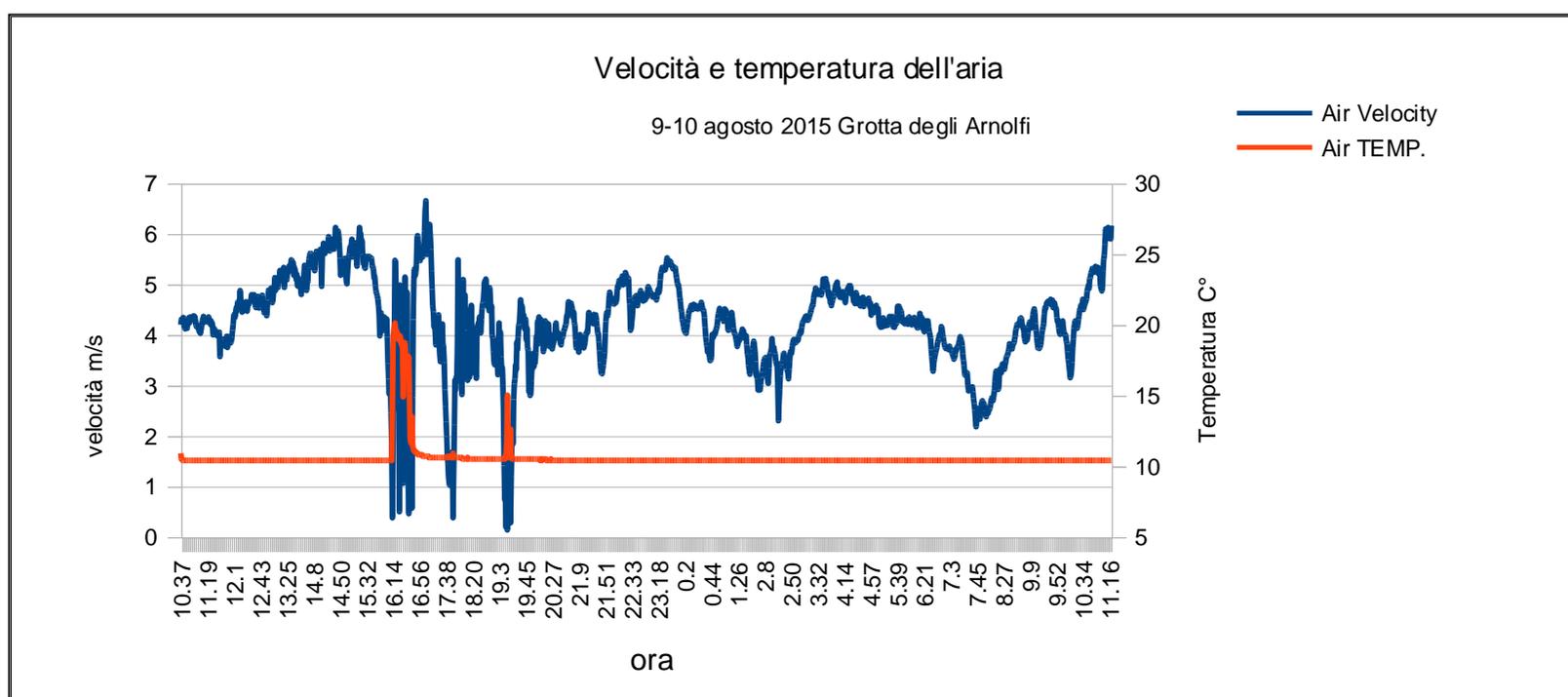


Fig. 6.5 - Monitoraggio della velocità del flusso d'ari e della temperatura dell'aria della Grotta degli Arnolfi.

A parte questi episodi il resto della serie mostra delle oscillazioni della velocità dell'aria che potrebbero suggerire delle ciclicità.

Un altro monitoraggio è stato condotto a fine dicembre a Grotta della Rocchetta, che comportandosi da ingresso alto in questo periodo presentava un flusso d'aria in uscita (**Fig. 6.6**). Per valutare l'influenza delle variazioni della pressione atmosferica esterna è stato posizionato un barometro datalogger nella stessa zona. Sia l'anemometro che il barometro sono stati programmati con un intervallo di campionamento di 1 minuto e sono stati attivati allo stesso momento. È evidente la stabilità della pressione atmosferica, in effetti dicembre 2015 è stato un periodo di prolungata alta pressione con scarse circolazioni ventose: anche la temperatura dell'aria, non riportata nel grafico, si è mantenuta costante, poco superiore ai 13° C. La velocità dell'aria dalla grotta mostra invece delle oscillazioni, seppur di minore entità rispetto a quelle registrate a grotta degli Arnolfi, con variazioni tra 1.6 m/s e 2.8 m/s. La misura è stata poi ripetuta, con condizioni meteorologiche simili, dal 31 dicembre 2015 al 2 gennaio 2016 (**Fig. 6.7**). Anche qui si notano delle oscillazioni della velocità dell'aria, un po' più pronunciate rispetto a quelle precedenti, variando da un minimo di 2 m/s a 4.5 m/s, mentre la temperatura si mantiene costante, variando da 13.0° C a 13.1° C.

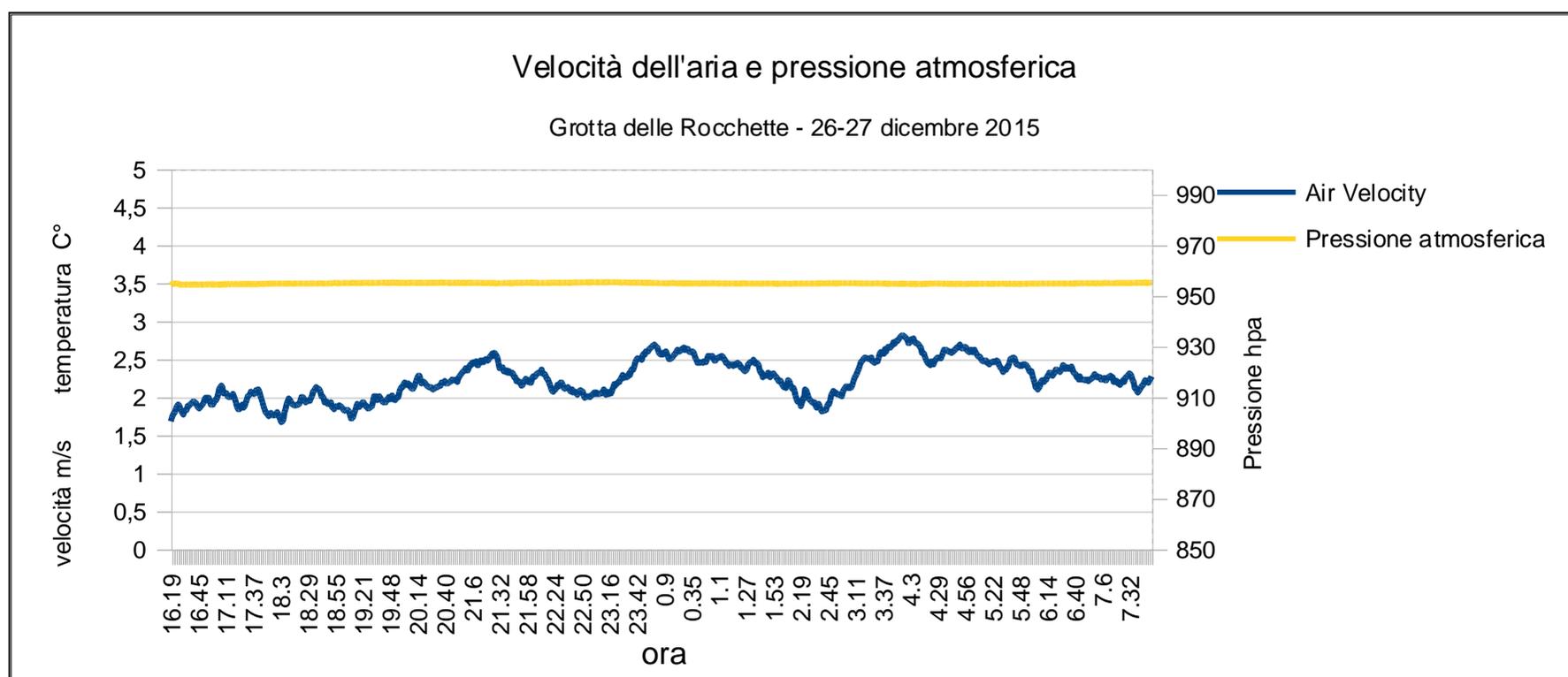


Fig. 6.6 - Monitoraggio della velocità dell'aria, della temperatura e della pressione atmosferica esterna a Grotta della Rocchetta (misure del 26-27/12/2015).

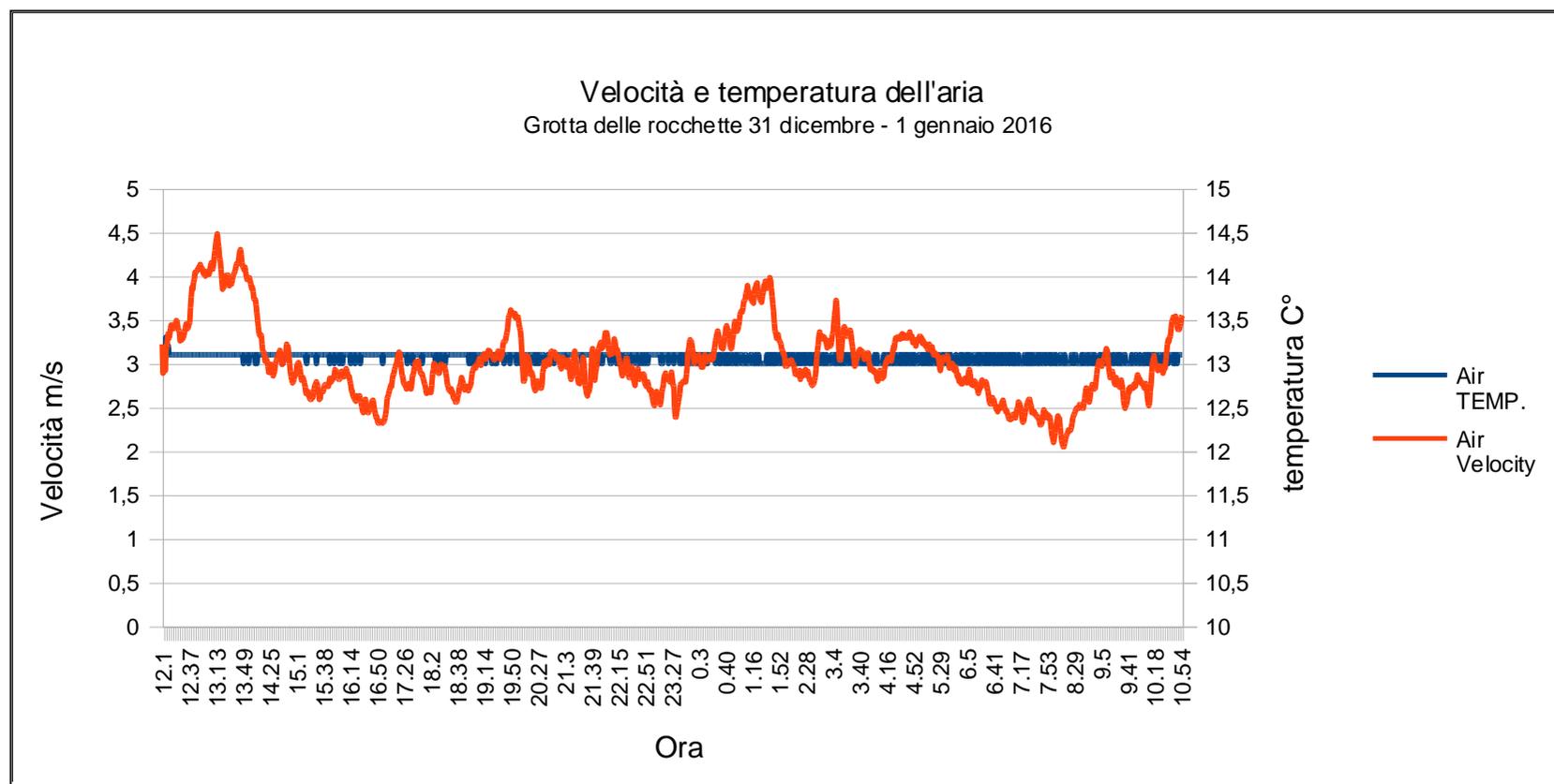


Fig. 6.7 - Monitoraggio della velocità dell'aria e della temperatura della Grotta della Rocchetta (misure del 31/12/2016 -01/01/2016).

I dati fin qui raccolti non sono sufficienti per un'analisi che permetta di verificare la presenza di ciclicità caratteristiche. Nel caso delle grotte sono in gioco frequenze molto basse e strumenti matematici come la Trasformata di Furier, che individua le frequenze caratteristiche di una serie, richiedono grandi quantità di dati. Come si vedrà nel prossimo Capitolo i dati di velocità di flusso d'aria acquisiti sono utili a supportare delle ipotesi di circolazione del massiccio calcareo: allo stesso tempo uno studio più approfondito sulle frequenze caratteristiche potrà essere un filone di ricerca interessante per il prossimo futuro.

7 - Analisi dei risultati e prospettive di sviluppo future

Di seguito vengono illustrati i risultati delle misure termo-igrometriche in continuo, acquisite all'interno e all'esterno delle grotte selezionate, e di quelle saltuarie della velocità del flusso d'aria in uscita da alcune di esse. Come mostrato nel Capitolo 2 (**Fig. 2.3**), la temperatura esterna al massiccio calcareo di Cesi è stata monitorata mediante due termo-barometri:

- uno collocato nella parte alta, in prossimità di grotta del Monte Torre Maggiore ad una quota di circa 1100 m s.l.m. (termo-barometro T_A);
- uno collocato nella parte bassa, in prossimità di grotta GIS ad una quota di circa 350 m s.l.m. (termo-barometro T_B).

La **Fig. 7.1** riporta il confronto della temperatura registrata dai termometri T_A e T_B per il periodo Novembre 2014 - Dicembre 2015. La temperatura media dell'aria nella parte alta del sistema (10.8°C) è stata di circa 4.7°C inferiore a quella registrata nella parte bassa (15.5°C). La rete di monitoraggio messa in opera è stata affidabile, come confermato dal confronto delle osservazioni del termometro T_B con quelle del termometro di San Gemini (posto a circa 309 m s.l.m., $T = 15.7^\circ\text{C}$), che è la stazione meteorologica ufficiale del Servizio Idrografico della Regione Umbria, situata a circa 3 km ad ovest di Cesi. Dai dati acquisiti risulta un gradiente termico verticale medio, tipico della zona, di 0.62°C per ogni 100 m di quota. Le temperature massime sono state registrate alla metà di luglio 2015, mentre quelle minime alla fine di dicembre 2014.

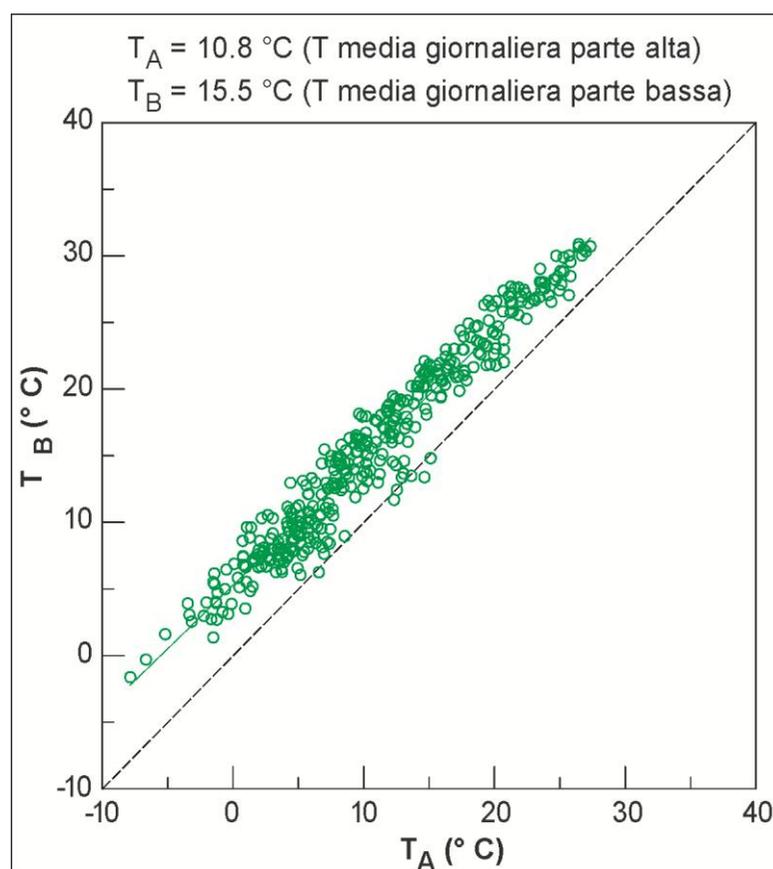


Fig. 7.1 - Confronto tra la temperatura giornaliera dell'aria nella parte bassa del massiccio calcareo (T_B) e quella alta (T_A) per il periodo Novembre 2014 - Dicembre 2015. La posizione di termometri è in Fig. 2.3, Capitolo 2.

Le misure di temperatura effettuate all'interno delle grotte consentono di fare delle considerazioni sulla circolazione dell'aria nel massiccio calcareo. In Appendice sono riportati gli andamenti delle temperature dell'aria e dell'umidità registrate all'interno delle grotte monitorate. Va premesso che non tutte le cavità, anche quelle poste a quote simili, mostrano lo stesso andamento termico durante il periodo di osservazione: questo indica che il sistema è molto complesso, come era da attendersi, e merita sicuramente ulteriori ricerche specifiche che non possono prescindere dall'approccio messo in opera dal presente progetto. I dati acquisiti infatti, oltre ad essere i primi a disposizione su questo sistema carsico, rappresentano sicuramente un primo passo per comprendere la circolazione d'aria del sistema carsico della montagna di Cesi e per indirizzare gli studi e i monitoraggi futuri. Di seguito si farà riferimento al comportamento di due grotte poste a quote molto diverse tra loro che danno degli indizi di interconnessione, considerando anche l'assetto geologico-strutturale del massiccio calcareo. Si tratta della grotta degli Arnolfi (grotta posta alla base del sistema carsico) e di Buca del Diavolo (grotta posta nella parte alta, in prossimità del Monte Torre Maggiore). La **Figura 7.2** mostra la temperatura dell'aria registrata all'interno e all'esterno di queste due grotte. Durante l'inverno/inizio primavera una grande quantità di aria fredda entra nella grotta degli Arnolfi (Fig. 7.2a), ma non appena la temperatura dell'aria esterna supera quella interna, il flusso d'aria inverte e l'aria fuoriesce dalla grotta. L'aria all'interno della grotta raggiunge gradualmente una temperatura di 11.5 ° C. A metà novembre 2015 si registra una nuova inversione del flusso d'aria che torna ad entrare nella grotta. Al contrario, la Buca del Diavolo mostra un comportamento, in termini termici e di flusso d'aria, speculare a quella degli Arnolfi: l'aria fuoriesce dalla cavità durante l'inverno con temperature che vanno da 11.4 ° C a circa 9.0 ° C.

Al fine di capire i volumi di aria in uscita, durante i mesi estivi dalla grotta degli Arnolfi e durante i mesi invernali dalla Buca del Diavolo, sono state effettuate delle misure saltuarie della velocità del flusso d'aria mediante il termo-anemometro acquisito nell'ambito del presente progetto. In dettaglio, le misure sono state condotte durante il mese di Agosto 2015 nella grotta degli Arnolfi e a fine febbraio 2015 a Buca del Diavolo. I volumi di aria in uscita dalla grotta degli Arnolfi sono stati di 1.85 m³/s mentre da Buca del Diavolo di 0.50 m³/s. Sempre durante il mese di Agosto 2015 le misure di flusso d'aria sono state estese a tutte le cavità poste alla base del massiccio calcareo (ad eccezione della grotta Eolia poiché l'accesso alla cavità è condizionato da una porta che ne condiziona il deflusso d'aria): complessivamente il volume d'aria in uscita durante l'estate, dalle cavità note, non è inferiore a 6 m³/s. Allo stesso tempo durante l'inverno dalle grotte alte (Buca del Diavolo e Rocchette di Cesi) fuoriesce un volume d'aria di circa 1.3 m³/s indicando che nella parte alta la fuoriuscita di aria è molto più diffusa e fortemente condizionata dalle caratteristiche litologiche e stratigrafiche delle rocce affioranti (Maiolica), dalla fitta rete di fratture e/o da altre cavità non ancora scoperte. Le ricognizioni speleologiche portate avanti nel 2014 nella parte sommitale di Torre Maggiore, intensificate durante il presente progetto, hanno permesso di esplorare con uno spirito diverso delle piccole cavità a cui in precedenza non si dava un grosso valore speleologico.

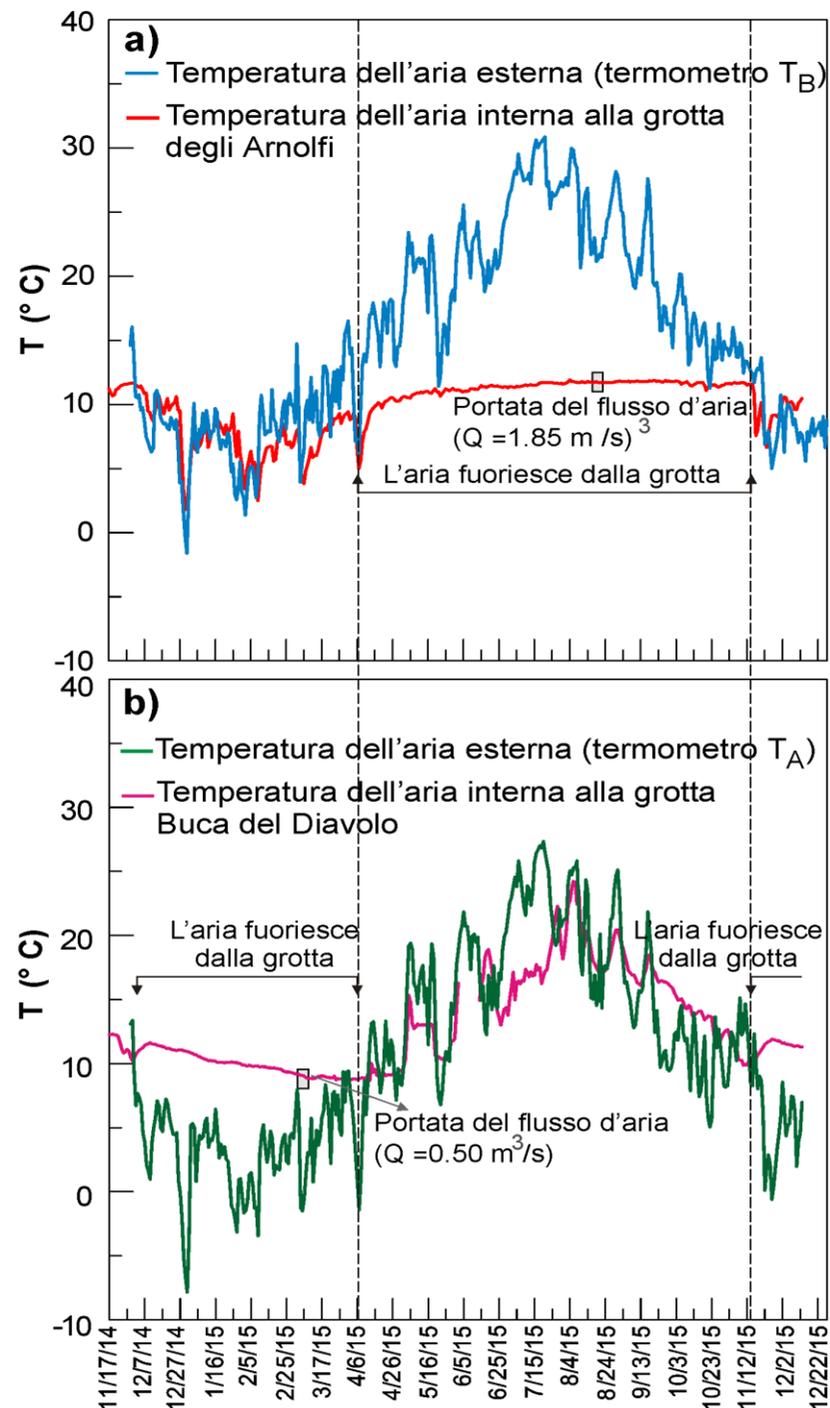


Fig. 7.2 – Temperatura dell'aria all'interno e all'esterno della Grotta degli Arnolfi (a) e di Buca del Diavolo (b). Periodo 2014-2015 (da Di Matteo et al., 2016).

Mettendo insieme i risultati della campagna di monitoraggio si possono fare delle ipotesi tenendo conto dell'assetto geologico-strutturale della Montagna di Cesi (vedi sezione geologica di **Fig. 2.3**). In particolare la sezione geologica passa attraverso le grotte Arnolfi e Buca del Diavolo, le cui temperature dell'aria sono state illustrate in precedenza (**Fig. 7.2**).

Come si può osservare dalla sezione geologica di **Fig. 2.3**, le rocce calcaree nella parte alta del massiccio sono piegate e fratturate: i sistemi di fratture estensionali rappresentano i percorsi preferenziali per la circolazione dell'aria e per l'infiltrazione dell'acqua sotterranea. Di recente

(febbraio 2016), una campagna speleologica sul Monte Torre Maggiore ha permesso di disostruire in parte una cavità impostata lungo una di queste fratture presenti nella Formazione della Maiolica (**Fig. 7.3**). Questo condotto è simile a quello di Buca del Diavolo, in termini geometrici, di andamento termico e di modalità di ventilazione: a fine febbraio 2016 la temperatura dell'aria era di 10.8 ° C mentre la portata d'aria in uscita era di circa 0.56 m³/s, cioè praticamente simili a quelli ottenuti per Buca del Diavolo a febbraio 2015 (durante la stessa modalità di ventilazione).



Fig. 7.3 – Particolare della nuova esplorazione speleologica in corso in una piccola cavità impostata all'interno di una zona fortemente fratturata nella Formazione della Maiolica nei pressi di Torre Monte Maggiore (la localizzazione è in **Fig. 2.3**).

I risultati qui ottenuti indicano che gli ambienti sotterranei - anche se di piccole dimensioni - sembrano essere interconnessi, tramite fratture aperte e/o condotti, con una cavità notevolmente più ampia presente nella sottostante Formazione del Calcere Massiccio. I collegamenti ad oggi non sono accessibili da un punto di vista esplorativo o lo sono solo in parte e quindi va rimarcato che le informazioni termiche e le velocità di flusso d'aria a disposizione da sole non danno una risposta definitiva sull'interconnessione tra grotte alte e grotte poste alla base del sistema carsico. Il presente studio deve essere considerato quindi come un primo passo nella comprensione di questo sistema carsico complesso e i risultati sono utili per configurare una rete di monitoraggio della velocità del flusso d'aria in continuo sulle principali cavità. Tale monitoraggio fornirà nuove informazioni sugli ambienti sotterranei anche tramite l'analisi dei fenomeni di risonanza e delle frequenze di oscillazione del flusso d'aria (vedi per esempio, Cigna, 1968; Plummer, 1969; Badino, 2010; Faimon et al., 2012; Lang e Faimon, 2013). In conclusione, lo schema concettuale presentato e i risultati qui discussi migliorano le conoscenze del sistema carsico, il quale risulta ancora ampiamente inesplorato. L'approccio presentato ha come obiettivo finale quello di valorizzare l'intero massiccio calcareo che risulta interessante non solo dal punto di vista speleologico ma anche geologico e storico-paesaggistico.

Appendice

I monitoraggi condotti presso le altre grotte, Grotta Gis, Grotta del Risucchio e Grotta della Rocchetta, indicano dei comportamenti che in linea generale sono in linea con i comportamenti attesi per gli ingressi bassi (le prime due), con temperature più stabili e umidità intorno a 100% durante la stagione estiva, quando le grotte soffiano, e per gli ingressi alti (la terza) con temperature più stabili durante l'inverno: nel complesso ognuna ha delle caratteristiche particolari.

Grotta Gis presenta delle circolazioni d'aria che sono influenzate dalle grandi dimensioni della grotta, ma mostra delle temperature in linea con le altre grotte (**Fig A.1**).

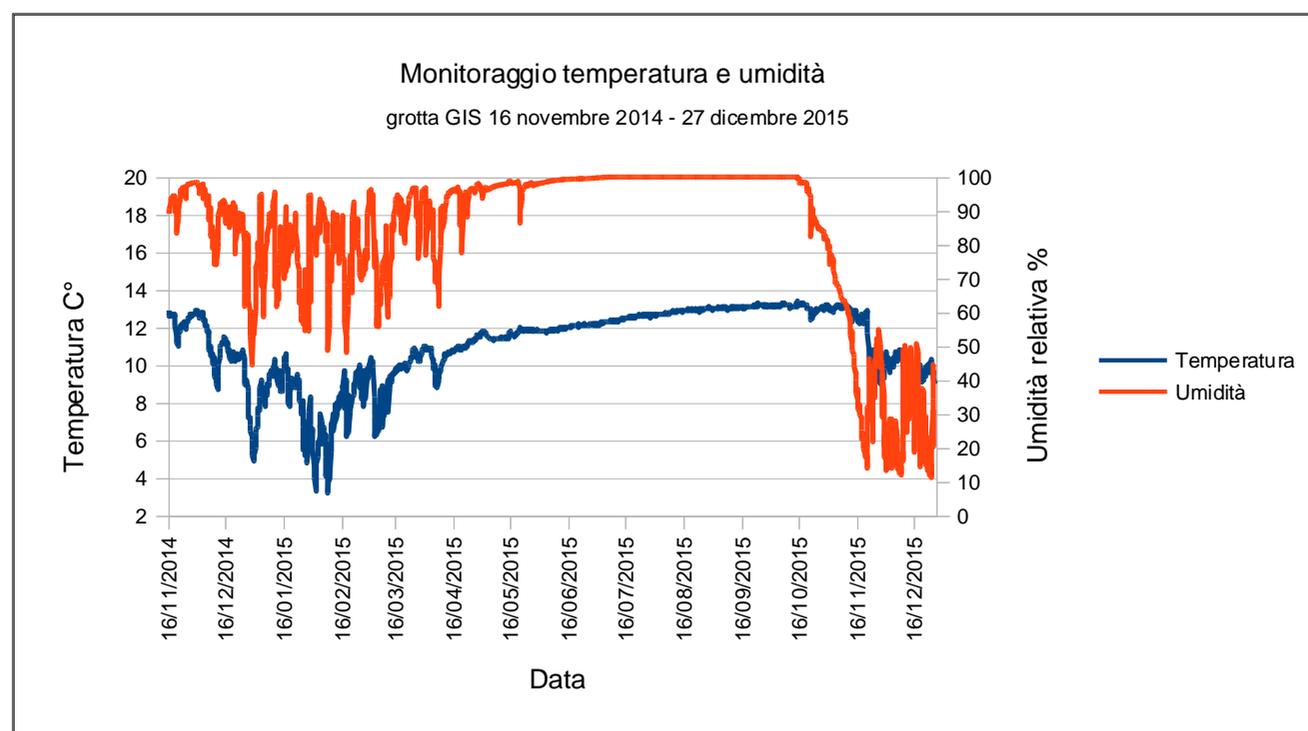


Fig. A.1 - Monitoraggio della temperatura ed umidità relativa dell'aria a Grotta Gis.

Grotta del Risucchio, pur trovandosi vicino al paese di Cesi, e trattandosi di una cavità piuttosto piccola, quindi facilmente influenzabile dalle condizioni esterne, in estate mostra una temperatura dell'aria interna che arriva sotto i 10°C, un paio di gradi in meno rispetto alle temperature delle altre grotte (**Fig. A.2**).

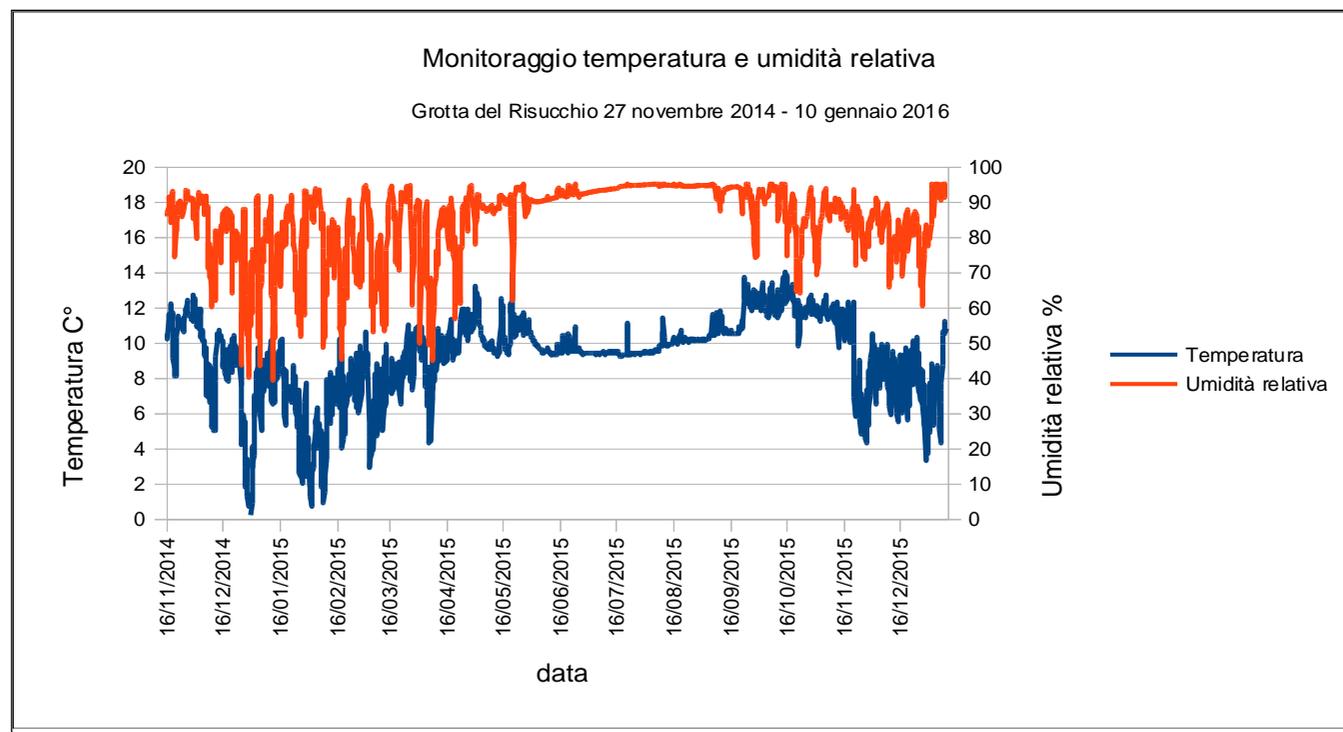


Fig. A.2 - Monitoraggio della temperatura e umidità relativa dell'aria a Grotta del Risucchio.

Grotta delle Rocchette, invece, ha una temperatura all'inizio dell'inverno di circa a 14-15 °C (quando la grotta inizia a soffiare), che poi scende gradualmente fino a 12° (**Fig. A.3**).

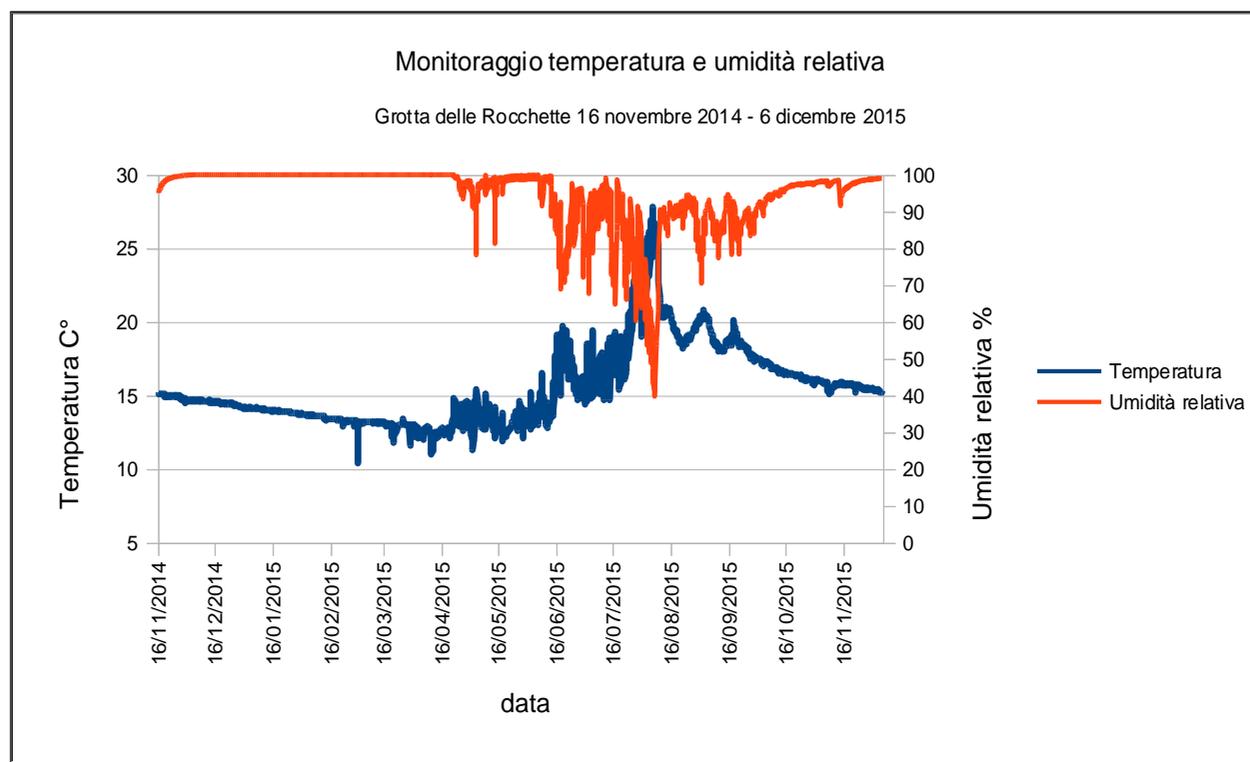


Fig. A.3 – Monitoraggio della temperatura e umidità relativa dell'aria a Grotta della Rocchetta.

Bibliografia

- Atkinson T.C., Smart P. L., Wigley T. M.L. (1983). *Climate and natural radon levels in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada*. Arctic and Alpine Research, 15, pp. 487-502.
- Badino G. (1995). *Fisica del clima sotterraneo*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, 7, Serie II, pp. 136.
- Badino G. (2008). *Micrometeorologia delle grotte*. I° Congresso DFG, Torino, 7-8 Aprile 2008.
- Badino G. (2010). *Underground meteorology - "what's the weather underground?"* Acta Carsologica, 39(3), pp. 427-448.
- Bögli A. (1978). *Karsthydrographie und physische Speläologie*. Springer, Berlin, 292 pp.
- Brozzetti F., Lavecchia G. (1995). *Evoluzione del campo degli sforzi e storia deformativa nell'area dei Monti Martani (Umbria)*. Bollettino Società Geologica Italiana, 114, pp. 155-176.
- Castellani V., Dragoni W. (1987). *Some considerations regarding karstic evolution of desert limestone plateaus*. In: "International Geomorphology", Part II, V. Gardner editor, John Wiley & Sons, pp. 1199-1206.
- Castellani V., Dragoni W. (1986). *Evidence for Karstic Mechanisms involved in the evolution of Moroccan Hamadas*. International Journal of Speleology, 15, pp. 57-71.
- Cattuto C., Gregori L., Melelli L., Taramelli A., Troiani C. (2002). *Palaeogeographic evolution of Terni Basin*. Bollettino Società Geologica Italiana, 1, pp. 865-872.
- Choppy J. (1986). *Microclimats. Phenomenes karstiques: processus climatiques*. Syntheses karstiques, 4, pp. 1-67.
- Cigna A.A. (1971). *An analytical study of air circulation in cave*. International Journal of Speleology, 3(1-2), pp. 41-54.
- Cigna A.A., Forti P. (1986). *The speleogenetic role of air flow caused by convection. 1st contribution*. Int. J. of Speleology, 15, pp. 41-52.
- Cigna A.A. (2002). *Modern trend in cave monitoring*. Acta Carsologica, 31(1), pp. 35-54.
- De Freitas C.R., Littlejohn R.N., Clarkson T.S., Kristament I.S. (1982). *Cave climate: assessment of airflow and ventilation*. Journal of Climatology, 2, pp. 383-397.
- De Waele J., Piccini L. (2008). *Speleogenesi e morfologia dei sistemi carsici in rocce carbonatiche*. In: Parise M., Inguscio S. e Marangella A. (Eds.), Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III Livello di Geomorfologia carsica, pp. 23-74.
- Di Matteo L., Dragoni W., Valigi D. (2009). *Update on knowledge of water resources of Amelia Mountains (Central Italy)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 1, pp. 83-96.

- Di Matteo L., Dragoni W. (2006). *Climate Change and Water Resources in Limestone and Mountain Areas: the case of Firenzuola Lake (Umbria, Italy)*. Proc. of 8th Conference on Limestone Hydrogeology, Neuchâtel, Switzerland, Presses universitaires de Franche-Comté, pp. 83–88.
- Di Matteo L., Menegon S., Rossi A. (2014). *L'ambiente ipogeo della montagna di Cesi (TR): primi risultati del monitoraggio termo-igrometrico all'interno della grotta degli Arnolfi*. Culture Territori Linguaggi, 4(I), pp. 117-127.
- Di Matteo L., Menegon S., Rossi A. (2016). *Understanding karst environments by thermo-hygrometric monitoring: preliminary results from the Cesi Mountain karst system (Central Italy)*. Sottomesso alla rivista Italian Journal of Groundwater in data 08.03.2016.
- Dragoni W., Verdacchi A. (1993). *First results from the monitoring system of the karstic complex "grotte di Frasassi-grotta grande del vento" (Central Apennines, Italy)*. Hydrogeological Processes in Karst Terrains (Proceedings of the Antalya Symposium and Field Seminar, October 1990), IAHS Publ. no. 207, 1993.
- Faimon J., Troppová D., Baldík V., Novotný R. (2012). *Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic)*. Int. J. Climatol.,
- 32, pp. 599 – 623.
- Geiger R., (1961). *Das Klima der bodennahen Luftschicht*. Braunschweig, Vieweg & Sohn, 640 p.
- Gregori L. (2012). *Terni, scheda n. 14*". In: Il "Viaggio in Italia" di J.W. Goethe e il paesaggio della geologia, (a cura di Mario Panizza e Paola Coratza), ISPRA, pp. 47-49.
- ISPRA (2010). *Archivio nazionale indagini del sottosuolo (L 464/1984)*.
http://sgi.isprambiente.it/indagini/scheda_indagine.asp?Codice=168676.
- Jeannin, P.-Y. (2001). *Modelling flow in phreatic and epiphreatic karst conduits in the HoANlloch Cave (Muotathal, Switzerland)*. Water Resources Res., 37, 191–200.
- Luetscher M., Jeannin P-Y (2004). *Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes*. Terra Nova, 16, pp. 344–350.
- Lismonde B. (1981). *Circulation d'air dans les réseaux souterrains à deux ouvertures*. In: "Colloque de Seyssins sur le Karst", Fédération Française de Spéléologie, pp. 37–53.
- Menichetti M., Tosti S. (2008). *Caratteristiche geologiche e microclimatiche della "Grotta che Fuma" nei Monti di Gubbio (233 U/PG)*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s.II(XXI), pp. 36-45.
- Lang M., Faimon J. (2013). *Is the Helmholtz resonator a suitable model for prediction of the volumes of hidden cave spaces?* In Proc. of 16th International Congress of Speleology, Edited by Michal Filippi and Pavel Bosák, V2, pp. 354-357.

- Pflitsch A., Wiles M., Horrocks R., Piasecki J., Ringeis J. (2010). *Dynamic climatologic processes of barometric cave systems using the example of Jewel cave and wind cave in South Dakota, USA*. Acta Carsologica, 39, 3, 449-462.
- Piali G. (1976). *Paleomagnetic stratigraphy of pelagic carbonate sediments*. Memorie della Società Geologica Italiana, XV, 128 pp.
- Plummer W.T. (1969). *Infrasonic resonances in natural underground cavities*. The Journal of the Acoustical Society of America, 46(5) Part I, pp. 1074-1080.
- Smithson P.A. (1991). *Inter-Relationships Between Cave and Outside Air Temperatures*. Theoretical and Applied Climatology, 44, pp. 65-73.
- Trombe F. (1952). *Traité de Spéléologie*. Payot, Paris, pp. 276.

