

EVOLUZIONE SPELEOGENETICA DEL SISTEMA CARSIKO DEL RE TIBERIO (VENA DEL GESSO ROMAGNOLA)

JO DE WAELE¹, FRANCESCO FABBRI¹, PAOLO FORTI¹, PIERO LUCCHI², STEFANO MARABINI³

Riassunto

Se l'esplorazione dei fenomeni carsici profondi di Monte Tondo (Vena del Gesso romagnola) può dirsi praticamente conclusa, poco invece è stato fatto per definirne globalmente l'evoluzione speleogenetica nel tempo. La presenza di alcuni livelli suborizzontali ben sviluppati, non solo all'interno della Grotta del Re Tiberio, ma anche in molte altre cavità facenti parte dello stesso sistema, ha permesso, per la prima volta, di tentare la correlazione di questi livelli con i terrazzi fluviali della valle del Senio (corrispondenti ai livelli di base carsici del periodo) e quindi di definire a grandi linee l'evoluzione temporale di questo sistema carsico, che, se si tralasciano i piccoli e rari fenomeni intramessiniani, è di gran lunga con i suoi oltre 150.000 anni, la più antica cavità nei gessi dell'Emilia-Romagna. Lo studio ha permesso anche di evidenziare come, nelle grotte in gesso, la velocità di adattamento delle forme carsiche ipogee alle variazioni climatiche esterne sia molto rapido e in particolare le gallerie antigrafitative si possano correlare con i periodi di aggradazione dei terrazzi nel periodo immediatamente successivo ad una fase fredda, di cui quindi possono essere considerati degli indicatori.

Parole chiave: livelli di base carsici, terrazzi fluviali, speleogenesi, gallerie antigrafitative, grotte epigeniche in gesso.

Abstract

Although the exploration of the deep karst systems in Mt. Tondo (Gypsum outcrop of the "Vena del Gesso romagnola") can be considered almost closed, only little is known about the speleogenesis and the evolution of these caves. The presence of some very well developed horizontal cave levels, not only in the Re Tiberio Cave but also in many other minor ones belonging to the same karst system, has allowed, for the first time, to attempt to make a correlation between these levels and the terraces of the Senio River (representing the local base level). This has enabled to define, at least in a general way, the temporal evolution of the cave system that is, without taking into account the short and small intra-Messinian karst phases, without any doubt the oldest cave (over 150,000 years) in the Emilia-Romagna region. The study has also allowed to put in evidence how, in gypsum caves, the speed of adaptation of the subterranean karst morphologies following external climate variations is extremely rapid and, more precisely, the antigrafitative (paragenetic) passages can be correlated to the aggradation periods of the fluvial terraces immediately after cold peaks. The antigrafitative passages can thus be used as palaeo-climatic indicators of the region in which they are formed.

Keywords: Karst Base Levels, Fluvial Terraces, Speleogenesis, Antigrafitative Passages, Epigenic Gypsum Caves.

¹ Istituto Italiano di Speleologia, Alma Mater Studiorum Università di Bologna

² Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna/Speleo GAM Mezzano

³ Museo Geologico Giovanni Capellini, Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Introduzione

La Grotta del Re Tiberio (fig. 1), che si apre nella valle del fiume Senio sulle pendici gessose di Monte Tondo, in comune di Rio-
lo Terme, è senza dubbio il fenomeno carsico della Vena del Gesso romagnola più importante e più studiato, almeno relativamente ad alcuni suoi aspetti particolari, (DE WAELE *et alii* 2011; LUCCI, ROSSI 2011). Questa grotta, già conosciuta in tempi antichi, deve molto della sua notorietà alle varie scoperte archeologiche, effettuate già a partire dalla metà del 1800 (SCARBELLI 1851; 1872) e proseguite sino ai giorni nostri (MIARI 2007; NEGRINI 2007; MIARI *et alii* in questo stesso volume), che documentano una sua frequentazione lungo un arco temporale di oltre 4000 anni.

L'insediamento archeologico, però, interessa solamente una minima frazione della grotta, limitandosi ai primi 60 metri dell'ingresso storico (la cosiddetta Tana del Re Tiberio), mentre il sistema carsico nel suo complesso, grazie soprattutto alle esplorazioni effettuate nell'ultimo decennio da parte dello Speleo GAM Mezzano (ERCOLANI *et alii* 2004 e vari altri interven-

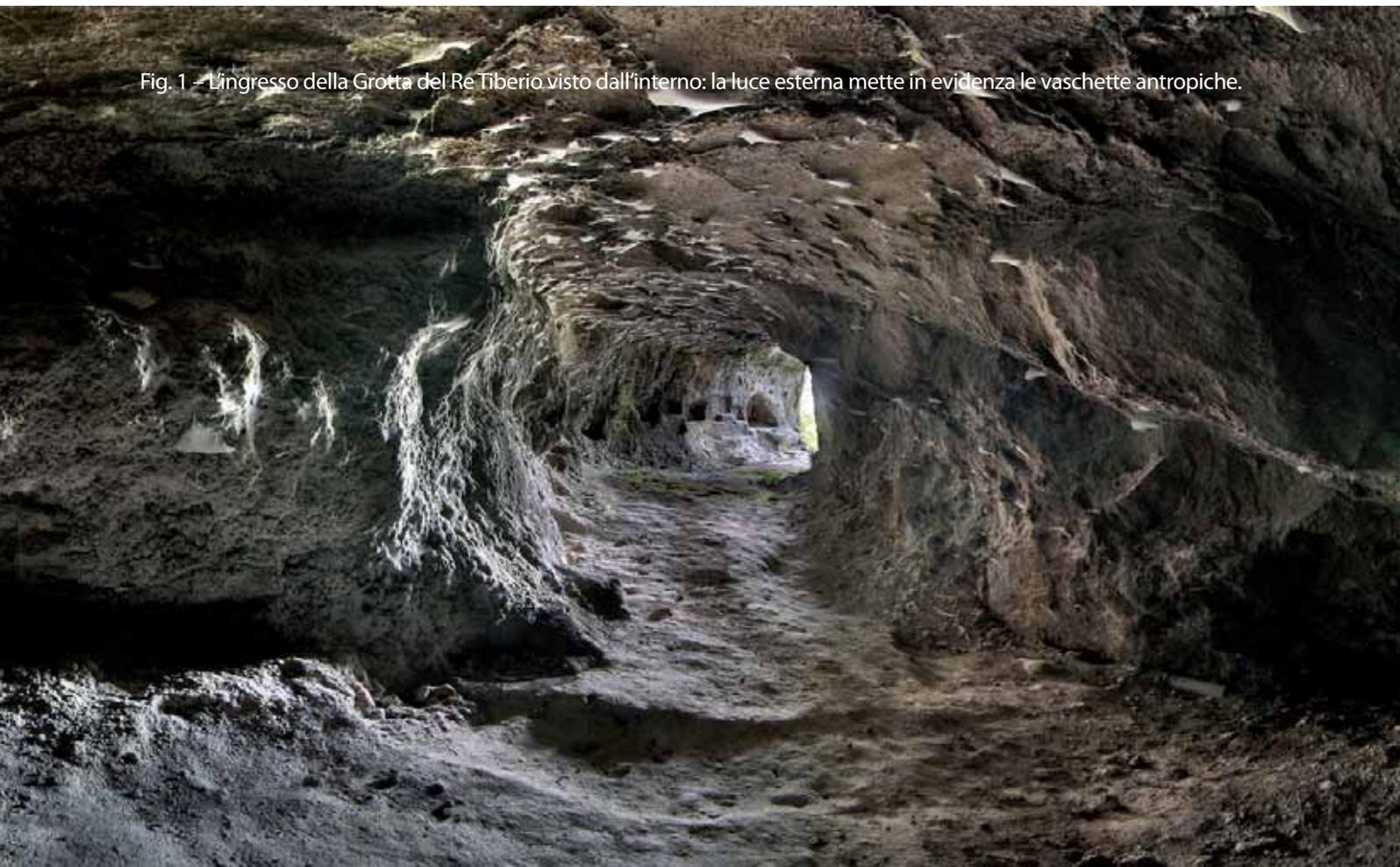
ti in questo stesso volume; LUCCI, MARABINI 2010; LUCCI, ROSSI 2011) attualmente è conosciuto uno sviluppo di circa 7800 metri e un dislivello totale di 227.

Se le esplorazioni del sistema possono ritenersi praticamente completate, ben diverso è il suo studio dal punto di vista speleogenetico ed evolutivo. La grotta è stata studiata in modo dettagliato dal punto di vista strutturale, mettendo in evidenza che la maggior parte delle gallerie seguono direzioni appenniniche (WNW-ESE) ed antiappenniniche (NE-SW) (GHISELLI *et alii* 2011), simili a quelle osservate nel vicino sistema del Rio Stella-Rio Basino (DE WAELE 2010).

Ad oggi, infatti, era stato esclusivamente ipotizzato a grandi linee il suo processo evolutivo (FABBRI 2011), che ha permesso di stabilire come la Tana del Re Tiberio sia stata essenzialmente una risorgente e abbia iniziato a svilupparsi ben prima dell'ultimo glaciale: fatto che rendeva questo sistema carsico uno dei più antichi, se non addirittura il più antico, della Vena del Gesso romagnola.

Inoltre la scoperta e la successiva esplorazione ad opera dello Speleo GAM Mezzano

Fig. 1 – L'ingresso della Grotta del Re Tiberio visto dall'interno: la luce esterna mette in evidenza le vaschette antropiche.



di alcuni frammenti del complesso carsico intercettati e in parte distrutti dalle gallerie di cava (ERCOLANI *et alii* in questo stesso volume) ha permesso di mettere in evidenza una complessità morfologica davvero insospettata e una ricchezza di speleotemi del tutto inusuali per le grotte in gesso della nostra regione (DE WAELE *et alii*, *Gesso, calcite e fango: come ricostruire dalle forme di dissoluzione e sedimentazione un'evoluzione particolarmente complessa nel sistema carsico del Re Tiberio*, in questo stesso volume).

Nel presente lavoro, dopo una breve descrizione sulla morfologia e idrogeologia del sistema carsico facente capo alla Risorgente del Re Tiberio, viene presentata una prima ricostruzione complessiva dei livelli carsici intercettati dalle gallerie minerarie e/o rilevati durante le esplorazioni speleologiche. Su questa base si è tentata la correlazione fisica tra le gallerie del sistema e i terrazzi fluviali lungo l'asta del Fiume Senio e la loro evoluzione temporale (MARABINI, VAI in questo stesso volume). In particolare all'interno di Monte Tondo si sono individuati 7 livelli carsici per i quali si è tentata una correlazione con gli stadi isotopici marini (MIS). Una correlazione indipendente dei terrazzi fluviali della Valle del Senio con il loro contenuto paleontologico e gli stessi MIS (MARABINI, VAI in questo stesso volume) permette di fissare alcuni punti di calibrazione temporale e di fare quindi una prima storia dell'evoluzione carsica dell'area di Monte Tondo.

L'area carsica di Monte Tondo

Fino all'inizio degli anni novanta le conoscenze relative ai sistemi carsici dell'area di Monte Tondo erano limitate al ramo fossile iniziale della Tana del Re Tiberio, l'ampio ingresso a 173 m s.l.m. visibile a distanza sulla parete in riva destra del Senio. Lo sviluppo delle gallerie esplorate all'epoca raggiungeva appena 300 metri. Erano inoltre parzialmente note alcune cavità del complesso carsico che fa capo

alla risorgente a nord ovest di Ca' Boschetti (GRUPPO SPELEOLOGICO "CITTÀ DI FAENZA", GRUPPO SPELEOLOGICO "VAMPIRO" 1964).

L'esplorazione sistematica dei sistemi carsici di Monte Tondo (ERCOLANI *et alii* in questo stesso volume), che ha richiesto alcuni decenni di intenso lavoro, è ormai giunta ad una fase avanzata. È stato così possibile definire in dettaglio sia lo sviluppo delle cavità sia l'idrologia sotterranea (ERCOLANI *et alii* 2004).

Attualmente l'estensione totale delle grotte conosciute nell'area di Monte Tondo è di circa 11 chilometri con dislivello totale di 247 metri (fig. 2).

Lo sviluppo delle morfologie presenti all'interno delle varie grotte esplorate è riconducibile fondamentalmente a giunti di strato e a discontinuità tettoniche costituite da faglie e diaclasi: i primi hanno avuto un ruolo fondamentale nella genesi delle ampie gallerie, che sono impostate lungo di essi; le seconde hanno favorito invece le morfologie gravitazionali rappresentate dai pozzi e dai canyon, essendo state tali linee disgiuntive sedi privilegiate dalla circolazione delle acque sotterranee che, abbassandosi progressivamente, hanno raggiunto il loro attuale livello di base.

L'orientamento generale della Grotta del Re Tiberio è NW-SE anche se ci sono molti corpi labirintici e alcune gallerie con tendenza SW-NE. La Tana del Re Tiberio si sviluppa per lo più orizzontalmente, con cinque livelli di gallerie sovrapposte collegati da brevi pozzi verticali. Le gallerie naturali sono numerose, suborizzontali, raramente inclinate con morfologie a canyon, tratti a volta piatta, numerose testimonianze di erosione antigrafitativa e gallerie fortemente condizionate dalla struttura (interstrati, fratture). In alcune aree imponenti depositi sedimentari sono ancora in attesa di essere studiati. In molti tratti, tuttavia, le condizioni naturali della grotta sono molto disturbate dalle gallerie di cava, rendendo la lettura delle caratteristiche sedimentologiche e morfologiche spesso difficile.

L'Abisso Cinquanta, dallo sviluppo com-

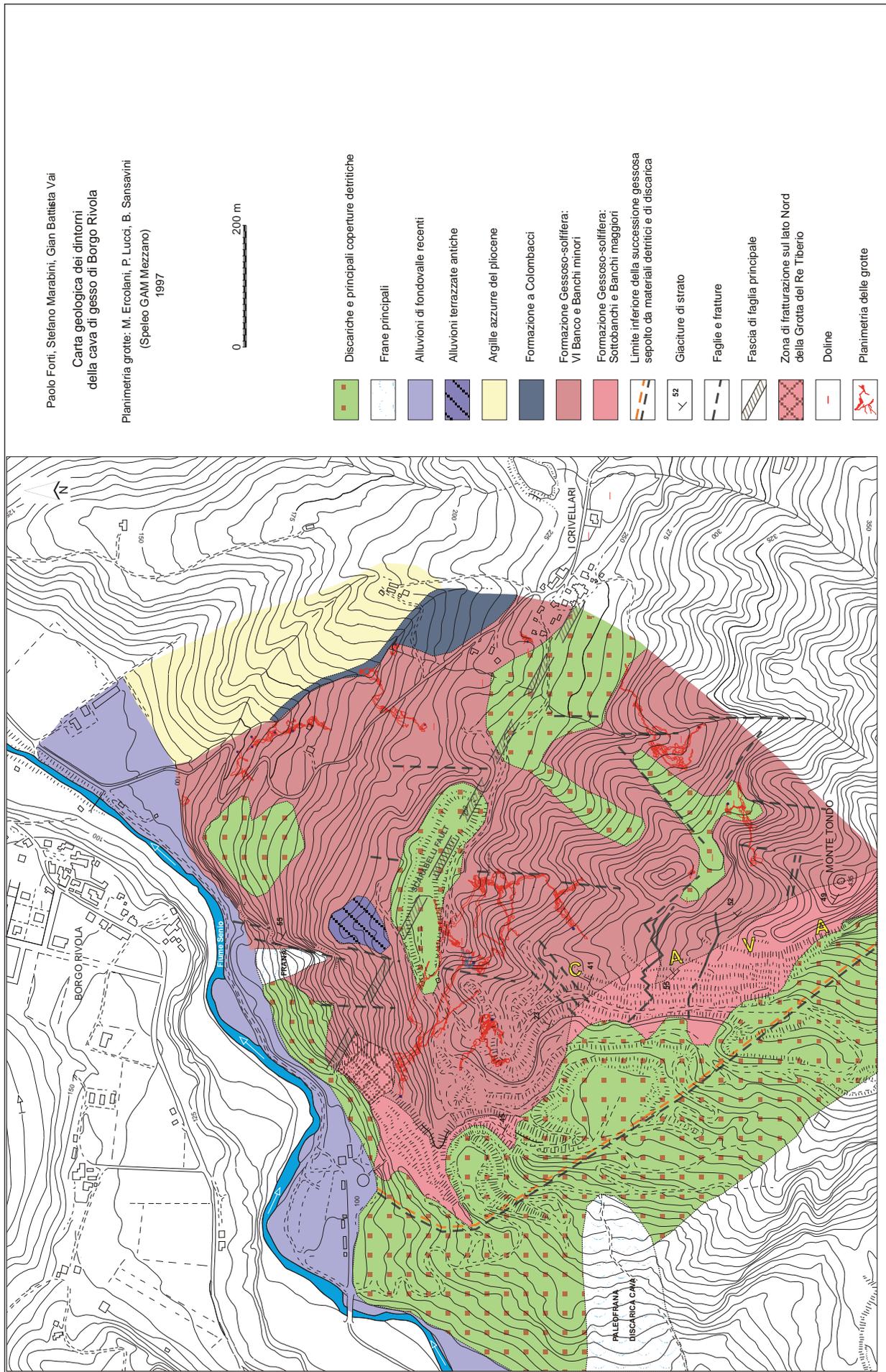


Fig. 2 – Carta geologica semplificata dell'area di Monte Tondo con indicate le principali condotte carsiche (da Forti et alii 1997).

plesso e articolato, è anch'esso caratterizzato da lunghe gallerie naturali sub-orizzontali, in cui sono presenti potenti riempimenti di sedimenti alluvionali, sovrapposte su più livelli e collegate fra loro da pozzi o da stretti e profondi canyon non sempre percorribili. Queste gallerie, nel corso della loro evoluzione verticale, hanno attraversato diversi banchi, tra cui forse anche alcuni cicli evaporitici minori, fino a raggiungere il III ciclo, posto alla stessa quota del torrente Senio.

La Grotta dei Tre Anelli risulta collegata idrologicamente al sistema del Re Tiberio, rispetto al quale si apre poco a monte. La morfologia dominante nella Grotta dei Tre Anelli è quella di una successione di pozzi intervallati da brevi condotte sub-orizzontali; fa eccezione il ramo di Nord-Ovest, pressoché sub-orizzontale, purtroppo in gran parte demolito dalle intersezioni con le gallerie della cava. Nell'evoluzione speleogenetica di questa grotta hanno avuto un ruolo importante, oltre che le ampie diaclasi, i giunti di stratificazione che coincidono pressoché con i soffitti piatti delle gallerie (LUCCI, ROSSI 2011).

L'Abisso Mezzano è l'inghiottitoio più alto (342 m) del sistema carsico del Re Tiberio ed è situato poche decine di metri ad est della sommità di Monte Tondo. Come le altre cavità di quest'area, questa grotta è caratterizzata da una sequenza di pozzi verticali che raccordano tratti orizzontali di cui, però, solo quello posto a quota 230 risulta essere ben sviluppato. La grotta è stata pesantemente mutilata dalle attività di cava, che ne hanno anche drenato le acque, che, attualmente, dopo un percorso artificiale in cava, raggiungono il ramo attivo della Tana del Re Tiberio.

Infine la Buca Romagna (GARAVINI 1997), che si apre a quota 299, un centinaio di metri a NE dall'Abisso Mezzano, è la seconda cavità per sviluppo dell'area di Monte Tondo (oltre 1200 m). Dal punto di vista morfologico differisce un poco dalle altre grotte perché, pur essendo anch'essa fatta a livelli sovrapposti, raccordati da pozzi verticali, i livelli solo raramente sono su-

borizzontali presentando molto più spesso andamenti più o meno inclinati. Il motivo di tutto questo va ricercato nel fatto che la Buca Romagna è un inghiottitoio che si apre esattamente nell'asta di un torrente molto acclive, che quindi ne ha condizionato completamente l'evoluzione. Questo fatto spiega anche come mai la Buca Romagna, pur aprendosi a Sud della "Faglia Scarabelli" risulti invece appartenere al sistema idrogeologico che fa capo alla Risorgente di Ca' Boschetti che si sviluppa totalmente a Nord di questa faglia.

L'idrogeologia carsica di Monte Tondo è rimasta per molto tempo totalmente sconosciuta e solo molto recentemente sono stati fatti studi volti alla sua definizione. Lo studio idrogeologico infatti è iniziato solamente nella primavera del 1997 (ERCOLANI *et alii* 2004). Attualmente è assodato che l'area di Monte Tondo è suddivisa in due sistemi idrogeologici carsici ben distinti, separati tra loro dalla "Faglia Scarabelli" (fig. 3):

A - Al primo, attualmente intercettato dalle gallerie di cava con risorgente nel piazzale della cava stessa, arrivano le acque dell'Abisso Mezzano che confluiscono nella Grotta del Re Tiberio, così come le acque provenienti dall'Abisso dei Tre Anelli, dall'Abisso Cinquanta e dall'Inghiottitoio del Re Tiberio. Il dislivello totale di questo sistema carsico è di 241 metri (ERCOLANI *et alii* in questo stesso volume).

B - Nel secondo sistema le acque della Buca Romagna confluiscono invece nella risorgente a nord ovest di Cà Boschetti, dopo aver attraversato la Grotta Grande dei Crivellari e le grotte I e II di Ca' Boschetti, mentre un affluente, proveniente dalla Grotta Enrica, si immette nel collettore principale della Grotta Grande dei Crivellari (ERCOLANI *et alii* in questo stesso volume).

L'evoluzione nel tempo del sistema carsico del Re Tiberio

Prima di questo studio le certezze sulla cronologia evolutiva del sistema carsico

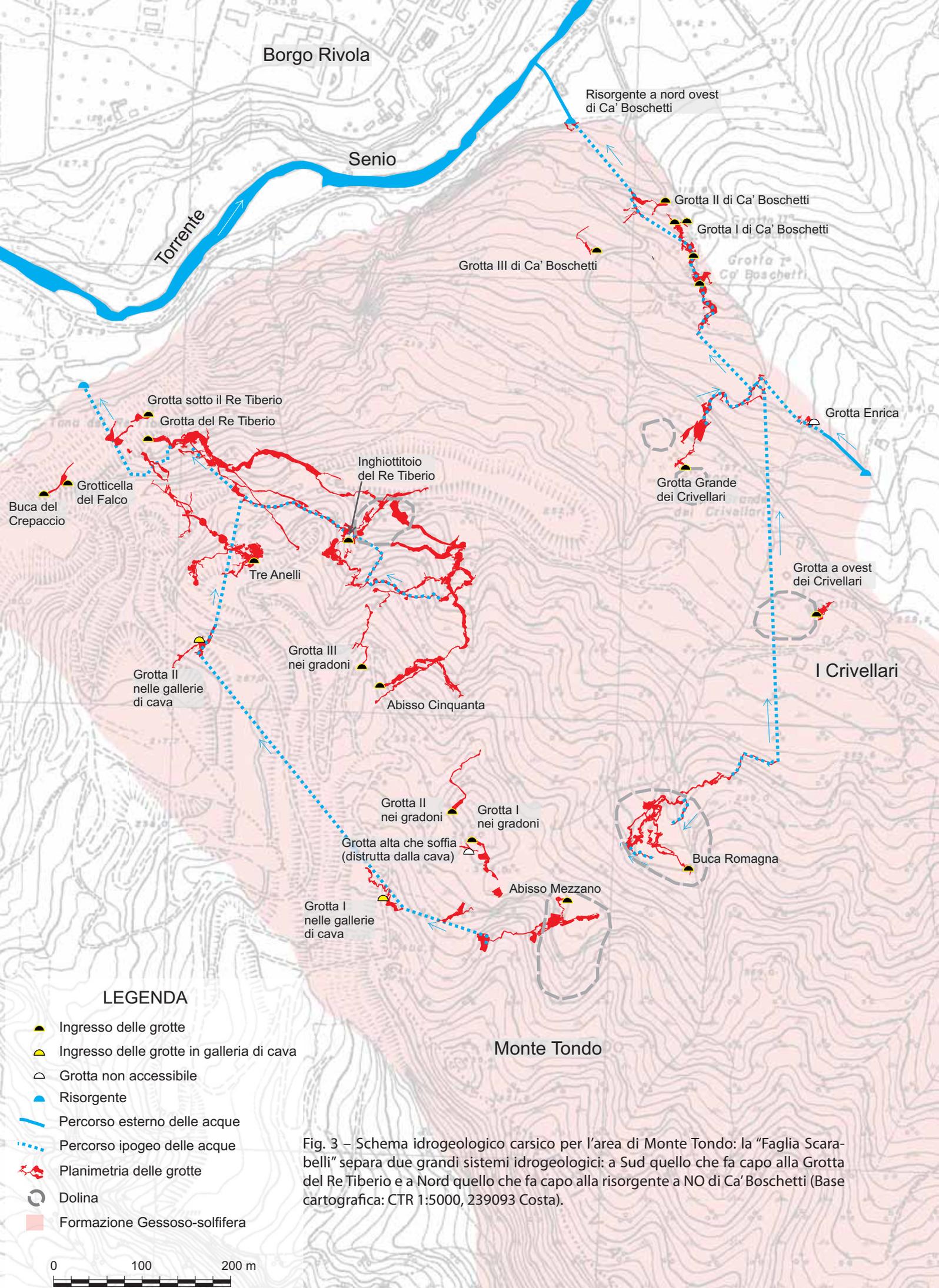


Fig. 3 – Schema idrogeologico carsico per l’area di Monte Tondo: la “Faglia Scarbelli” separa due grandi sistemi idrogeologici: a Sud quello che fa capo alla Grotta del Re Tiberio e a Nord quello che fa capo alla risorgente a NO di Ca’ Boschetti (Base cartografica: CTR 1:5000, 239093 Costa).

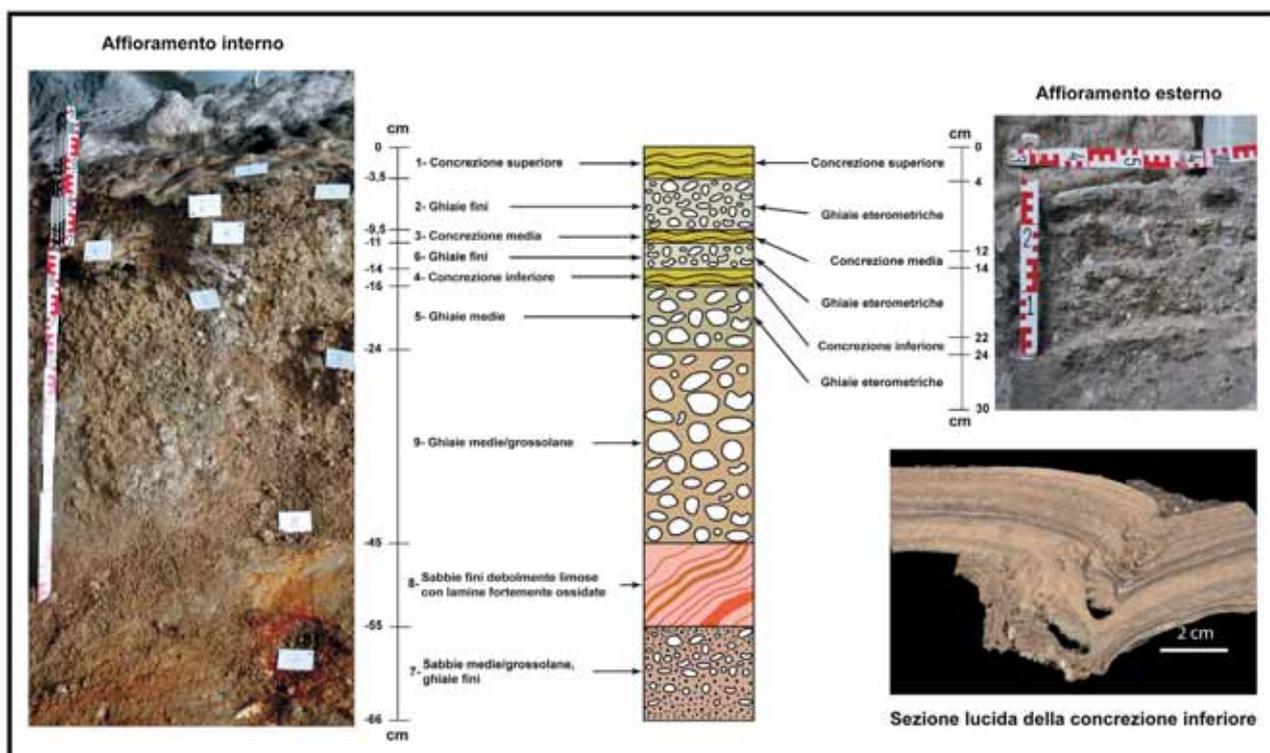


Fig. 4 – Le concrezioni di carbonato di calcio rinvenute nel letto del torrente durante gli scavi archeologici condotti nella zona archeologica all’ingresso della Grotta del Re Tiberio (Fabrizio Finotelli, relazione inedita, modificata).

facente capo alla Risorgente del Re Tiberio erano assolutamente scarse: unici “punti fissi” erano il fatto che oltre 4000 anni fa il suo ingresso era già stato utilizzato dagli uomini preistorici, fatto questo che indicava come, a quel tempo, almeno quella porzione della grotta avesse già perso la quasi totalità della sua funzione idrologica, e la presenza di un terrazzo fluviale a quota 219 m slm, che, in qualche modo, avrebbe marcato il primo stadio di sviluppo maturo del sistema come condotto carsico drenante l’area di Monte Tondo (FABBRI 2011).

Durante i recentissimi saggi archeologici, che hanno interessato i primi metri di grotta, era stato poi effettuato anche uno studio sui sedimenti presenti nel letto del torrente sotterraneo, che aveva portato a scoprire l’esistenza, al di sotto del piano di calpestio umano, di un’alternanza di sedimenti ghiaiosi-sabbiosi e di 3 crostoni concrezionari di carbonato di calcio (fig. 4).

Questi speleotemi sono più antichi dello strato archeologico, essendo stati rinvenuti al di sotto dello stesso. Considerando che il meccanismo della dissoluzione incongruente, unico in grado di permettere

lo sviluppo di concrezioni di carbonato di calcio in ambiente gessoso (FORTI, RABBI 1981), richiede la presenza di un elevato tasso di anidride carbonica nelle acque di percolazione, ne consegue che, limitatamente ai periodi di sviluppo degli speleotemi di carbonato di calcio, al di sopra e nei dintorni della grotta doveva esserci una copertura vegetale ben sviluppata che garantisse un sufficiente apporto di materiale organico e quindi di CO_2 . Questi speleotemi, quindi, indicherebbero un clima almeno temperato, sicuramente non freddo. È probabile quindi che i crostoni si siano formati nei periodi caldi postglaciali, non più di 8000 anni fa (vedi anche fig. 10), oppure prima dell’ultimo massimo glaciale, quindi ben oltre 20.000 anni fa.

In ogni caso quando si stavano formando queste concrezioni, la grotta non poteva più essere la risorgente unica del sistema carsico, altrimenti lo sviluppo dei crostoni a livello del letto fluviale sarebbe stato impedito dalle ricorrenti piene. Questo fatto dimostra quindi che in quel periodo doveva necessariamente già esistere ed essere ben sviluppato un livello di drenaggio car-

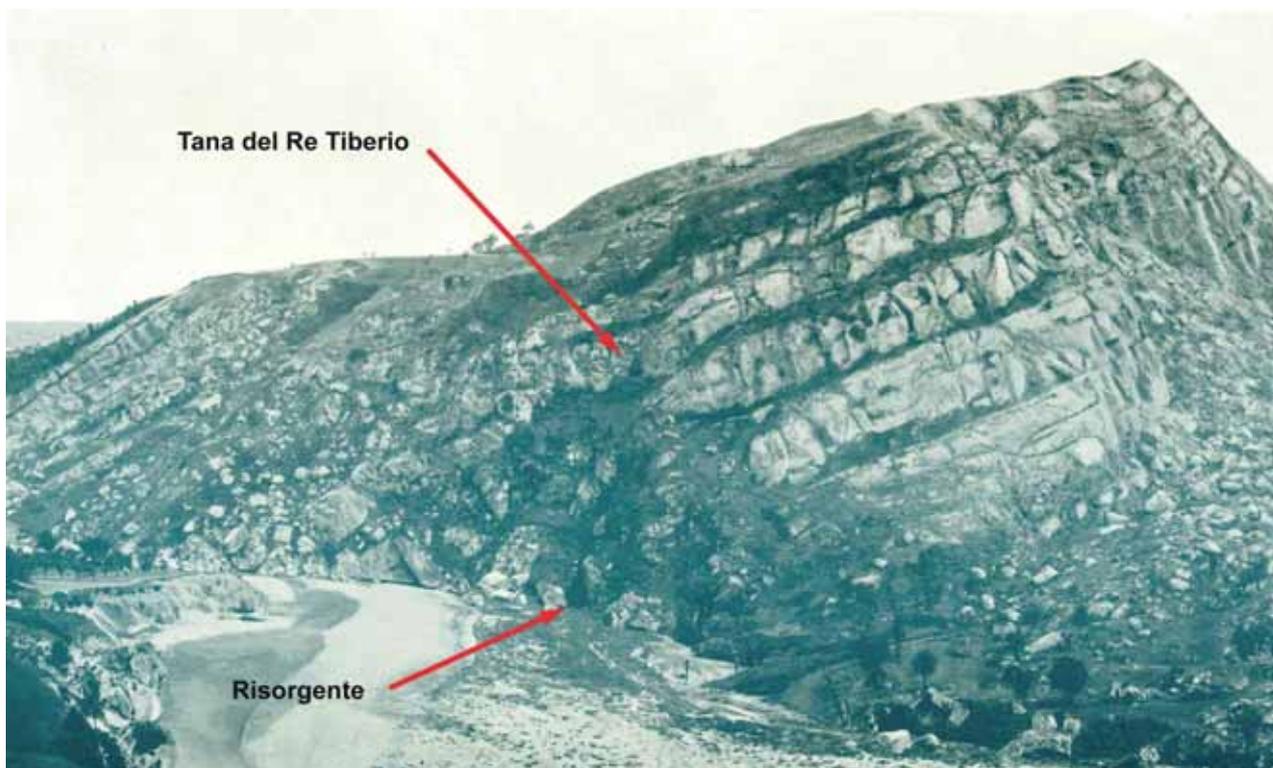


Fig. 5 – Foto di fine Ottocento (?) con evidenziato l'ingresso della Tana del Re Tiberio (1) e la sua risorgente a livello del Senio (2) (da ORSINI 1907).

sico già più basso.

Infine i sedimenti ghiaioso-sabbiosi, che si trovano alternati ai crostoni carbonatici, sono stati depositi in eventi occasionali di piena o di grandi piogge in cui il nostro livello di grotta tornava ad essere in parte idrologicamente attivo per il trasporto di sabbie e ciottoli dall'esterno, tramite la condotta oppure direttamente tramite fratture.

È evidente che al fine di una corretta definizione temporale dell'evoluzione del sistema carsico sarebbe estremamente importante la datazione radiometrica dei tre livelli di concrezioni carbonatiche, anche perché è assai probabile che siano tra le più antiche concrezioni esistenti nelle grotte in gesso della nostra regione ove, sino ad oggi, praticamente non è mai stato trovato in situ uno speleotema sviluppatosi prima dell'ultimo Massimo Glaciale (FORTI, CHIESI 2000; FORTI 2003).

Ma al fatto che le "certezze numeriche" sono attualmente molto scarse, e chiaramente del tutto insufficienti, per definire in dettaglio l'evoluzione del sistema carsico del Re Tiberio, si può per il momento

ovviare considerando che un'attenta valutazione degli elementi morfologici della cavità e un raffronto degli stessi sia con quelli delle altre grotte presenti nell'area sia in generale con le forme erosive relitte presenti nel territorio. Quest'analisi può permettere di delineare con sufficiente approssimazione, anche se con una certa indeterminazione temporale, i principali stadi che ne hanno caratterizzato lo sviluppo.

La Tana del Re Tiberio, che si apre a 173 m slm, e si trova elevata di circa 79 metri rispetto all'alveo attuale del fiume Senio, presenta caratteristiche morfologiche assolutamente assimilabili a quelle di una paleorisorgente direttamente collegata ad un paleolivello di base di quando il corso d'acqua scorreva 79 m più in alto di oggi. Il fatto che l'ingresso fosse una risorgente è confermato dall'imbricazione dei clasti nei sedimenti depositati dal fiume ipogeo, poco prima che questo fuoriuscisse dall'ammasso gessoso.

Molto interessante è la fotografia originale dell'area risalente forse alla fine dell'Ottocento (ORSINI 1907) in cui è possibile osser-

vare non solo l'ingresso della Tana del Re Tiberio, in alto, ma anche la sua risorgente attiva a livello del Senio (fig. 5) a quota 101 m slm.

Nel 1958, una delle prime azioni attuate nella cava di gesso dell'ANIC, subito dopo il suo insediamento a Monte Tondo, è stata quella di trasformare la risorgente carsica naturale in una galleria con pavimento e pareti di calcestruzzo (fig. 6), fossilizzando così il livello di base carsico, che da quel momento non ha più risentito dell'evoluzione del fiume Senio. In questo modo negli ultimi 60 anni la rapida escavazione del letto fluviale, che ha portato a far scorrere attualmente il Senio ad un livello di circa 94 m slm, non ha potuto ulteriormente influire sull'evoluzione del sistema carsico del Re Tiberio.

Prima che questo accadesse, però, l'asta fluviale del Senio aveva, da sempre, rappresentato il livello di base locale per le acque di infiltrazione carsica ed ha con-

dizionato quindi tutta la sua evoluzione fino al 1958. Questo fatto è confermato dalla struttura del ramo principale della Grotta del Re Tiberio che consiste in una lunga galleria suborizzontale con debole acclività costante (circa il 2%, in pratica una classica "galleria drenante") a partire dall'ingresso della grotta sino al cuore del Monte Tondo. È quindi logico che, per un tempo molto lungo, dal portale attuale della cavità tornasse alla luce il fiume sotterraneo che fungeva da drenaggio di tutti i sistemi carsici esistenti al di sopra della sua quota.

Inoltre e soprattutto, per meglio capire l'evoluzione del sistema carsico si è provveduto a disporre altimetricamente tutti i rami suborizzontali presenti nelle grotte che fanno capo al sistema carsico del Re Tiberio (fig. 7): si sono identificati pertanto 7 distinti livelli suborizzontali a partire dal più elevato a quota 342 m slm (alcuni tratti nell'Abisso Mezzano) fino a quel-



Fig. 6 – Foto del 1958 in cui si vede chiaramente come la risorgente del sistema sia stata trasformata in una galleria mineraria con pareti e pavimento di calcestruzzo per un percorso di oltre 100 metri all'interno di Monte Tondo.

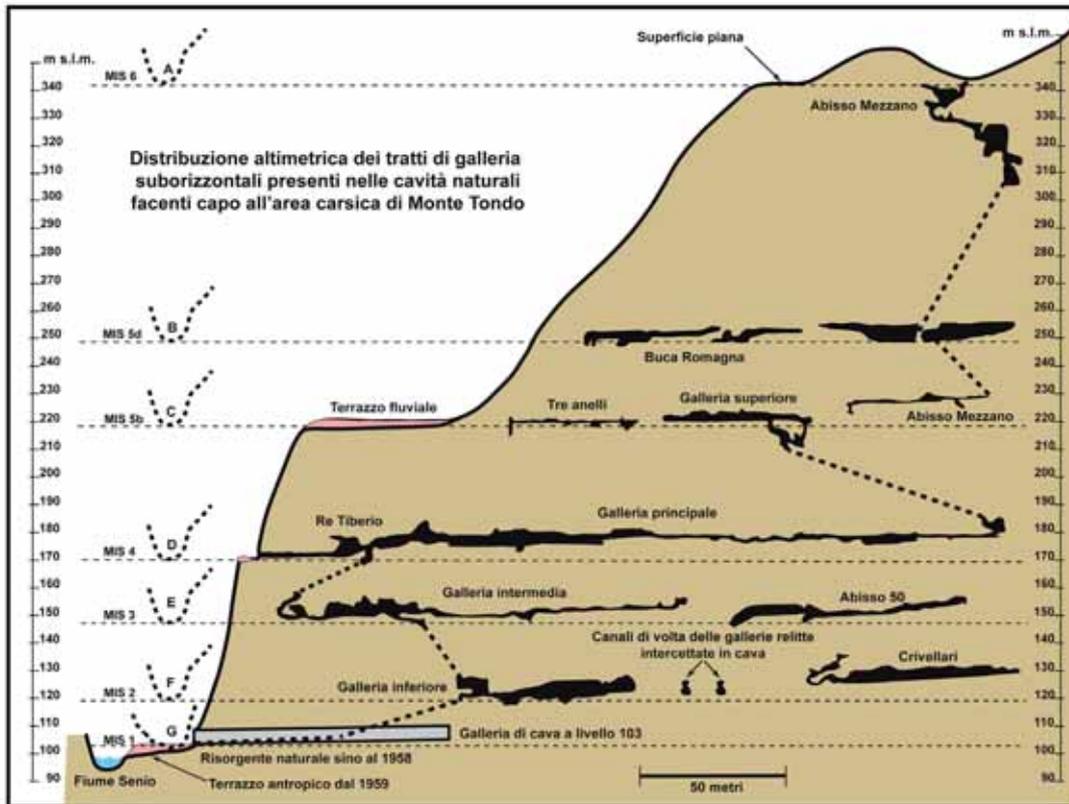


Fig. 7 – Sezione schematica dell'area di Monte Tondo in cui sono riportati altimetricamente i principali tratti suborizzontali delle varie cavità dell'area.

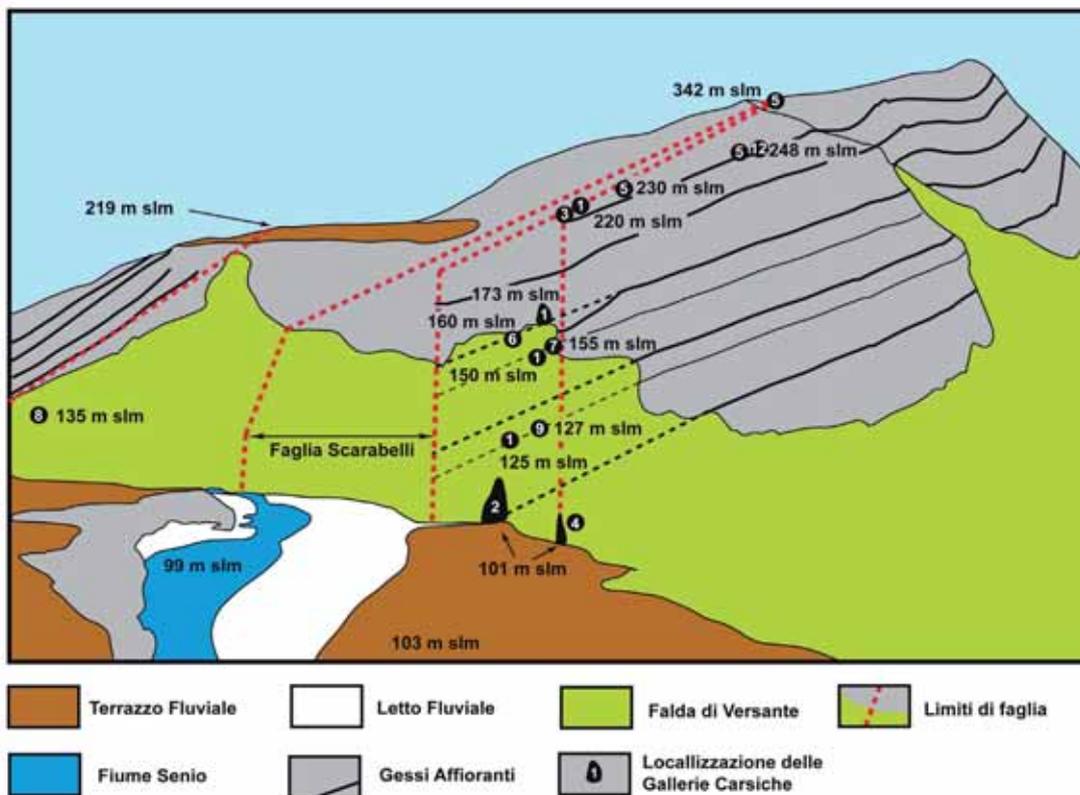


Fig. 8 – Schema morfologico dell'area di Monte Tondo ricavato dalla foto di fig. 5, su cui sono state riportate anche le posizioni delle gallerie orizzontali di fig. 7: 1- Tana del Re Tiberio; 2- Risorgente del Re Tiberio; 3- Grotta dei Tre Anelli; 4- Grotticella completamente occlusa da ciottoli e sedimenti fini fluviali; 5- Abisso Mezzano; 6- ingresso alto della galleria ascendente di livello 160 m slm; 7- Abisso Cinquanta; 8- Grotta Grande dei Crivellari; 9- Canali di volta delle gallerie intercettate dalla cava a livello 116 e 140.

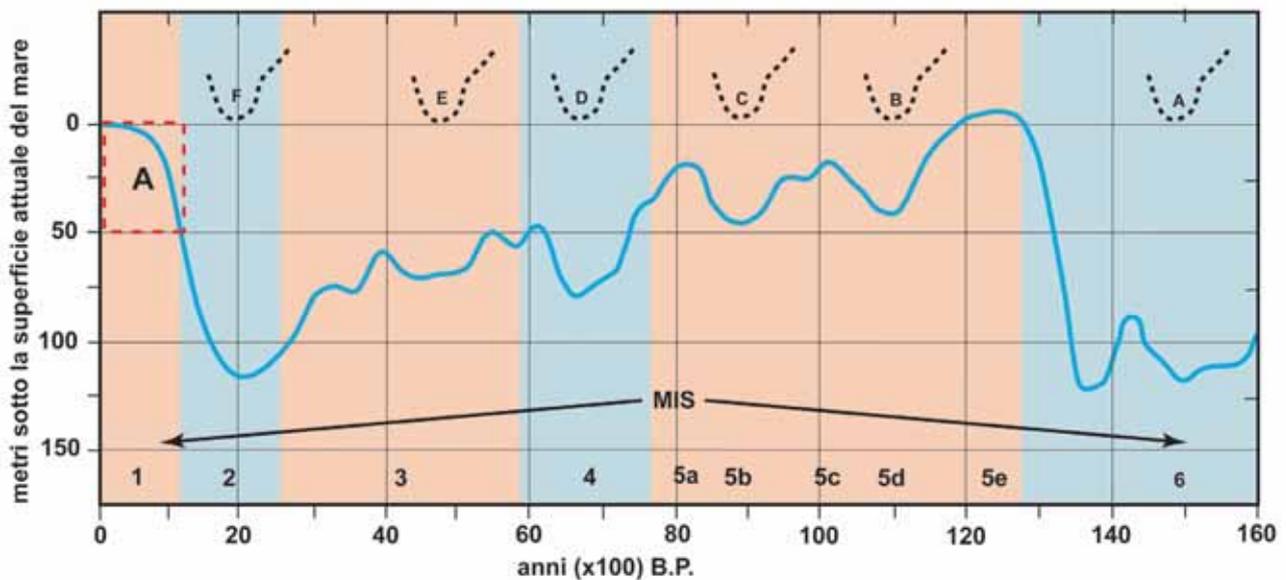


Fig. 9 – Diagramma delle variazioni del livello marino negli ultimi 160.000 anni in cui sono state posizionate le paleovalle di fig. 7 (modificato da TESSON *et alii* 2000).

lo della risorgente a 101 m slm. Mentre per quel che riguarda le morfologie piane dell'ammasso gessoso all'esterno, in aggiunta all'evidente terrazzo di quota 219 m slm e stato trovato un piccolo lembo di alluvioni anche alla quota del Re Tiberio (circa 170 m slm), e sono stati riscontrati anche alcuni ripiani a quota 340 m slm circa. Oltre all'evidente terrazzo fluviale a quota 219 m slm, un piccolo lembo è stato trovato anche alla quota della Tana del Re Tiberio (circa 170 m slm), mentre alcune superfici piane, corrispondenti anche alle quote di alcune paleovalle nella zona, si trovano a quota 340 m slm circa.

Le stesse gallerie suborizzontali sono state poi proiettate sullo schema morfologico ricavato dalla foto già citata (fig. 8), da cui risulta evidente che solo la Grotta Grande dei Crivellari si trova al di fuori della zona interessata dalla "Faglia Scarabelli" e quindi evidentemente non ha mai direttamente fatto parte del sistema carsico del Re Tiberio. Da questo schema si deduce anche che tutti i tratti suborizzontali si sono sviluppati a livello di interstrati, laddove questi intersecavano il livello di base carsico di quel determinato periodo.

La testimonianza più alta in quota di un livello di base stabile nel tempo nelle grotte del Monte Tondo la troviamo nell'Abisso Mezzano, dove esiste una piccola gal-

leria suborizzontale a quota 330 m slm (fig. 7). La quota del suo ingresso (342 m slm) corrisponde ad un evidente "gradino" morfologico suborizzontale che potrebbe corrispondere al ripiano di Sasso Letroso. Inoltre, anche la sella morfologica della paleovalle del Rio Stella, 1400 m ad est, si trova a 355 m circa e potrebbe corrispondere alla stessa superficie, data la sua collocazione in un ramo idrografico laterale e quindi ragionevolmente più acclive della valle del Senio. Questo omogeneo intervallo di quote di terrazzamento e di tratti suborizzontali nelle grotte, che è tra l'altro di ampia distribuzione areale, è ragionevole che corrisponda a un prolungato livello di base glaciale e quindi si ipotizza che possa corrispondere alle fasi fredde del MIS 6 (ca. 150.000 anni fa) (fig. 9).

Al di sotto di questo livello, per quasi 100 metri di intervallo altimetrico non si conoscono altri livelli suborizzontali di grotte. I successivi chiari segni di stasi nell'approfondimento della valle del Senio, con relativa formazione di condotti carsici suborizzontali, si trovano alla quota di circa 250-245 m slm, nella Buca Romagna e nell'Abisso Mezzano (meno chiaro perché coinvolti in fenomeni di crollo). A quote leggermente più basse (230-220 m slm) si trovano altri tratti di gallerie suborizzontali nelle grotte dei Tre Anelli, il Re Tiberio

e l'Abisso Mezzano. Ambedue questi gruppi di gallerie carsiche appaiono correlarsi abbastanza bene con lembi di terrazzo che si conservano nelle porzioni più elevate dei versanti del Senio (MARABINI, VAI in questo stesso volume), e in particolare le gallerie tra quota 230 e 220 corrispondono bene con l'ampio ripiano terrazzo esterno di quota 219 m slm che conserva ancora copertura ghiaiosa (si osservi la sua originaria estensione nella foto forse di fine Ottocento in fig. 5). Con la dovuta cautela, è da ritenersi verosimile che questi distinti livelli di carsismo possano attribuirsi rispettivamente ai periodi di freddo relativo e parziale abbassamento del livello marino MIS 5D e MIS 5B, rispettivamente 110 e 90 mila anni fa, che contraddistinguono la seconda parte dell'ultimo interglaciale (fig. 9).

La galleria principale del Re Tiberio, posizionata tra 180 e 173, ed i circoscritti residui di depositi ghiaiosi trovati poco sotto ed a valle del suo ingresso, si sarebbero di conseguenza formati nell'importante periodo freddo e di forte abbassamento eustatico del MIS 4, circa 70.000 anni fa (fig. 9).

La galleria intermedia del Re Tiberio e una galleria dell'Abisso Cinquanta, ambe-

due scavate a quota 145-150 m slm, corrispondenti ad un ripiano alto di Borgo Rivola (136 m slm) (MARABINI, VAI in questo stesso volume), corrisponderebbero ad un periodo in cui la valle si è allargata, probabilmente in un periodo freddo nel MIS3 (circa 48.000 anni fa) (fig. 9).

La galleria inferiore del Re Tiberio e quella principale della Grotta dei Crivellari (circa 125-130 m slm), e la sommità dei canali di volta delle gallerie relitte intercettate dalla cava a 129-130 m slm, corrispondono al ripiano principale di Borgo Rivola, che verso valle si allarga nei vasti ripiani terrazzati che si raccordano al terrazzo di Riolo Terme (MARABINI, VAI in questo stesso volume). È verosimile che questo livello di base possa attribuirsi all'ultimo piccolo glaciale del MIS 2 (circa 20.000 anni fa) (fig. 9).

Infine si constata che l'attuale Risorgente del Re Tiberio, ora intercettata dalla galleria di cava a 101 m slm, si colloca topograficamente più in basso del terrazzo basso di Borgo Rivola (105-106 m slm), che si trova a poca distanza proprio di fronte alla risorgente ed è riconoscibile saltuariamente anche a valle dello stesso abitato. Nell'ipotesi che tale terrazzo si sia formato per aggradazione fluviale circa 6000-

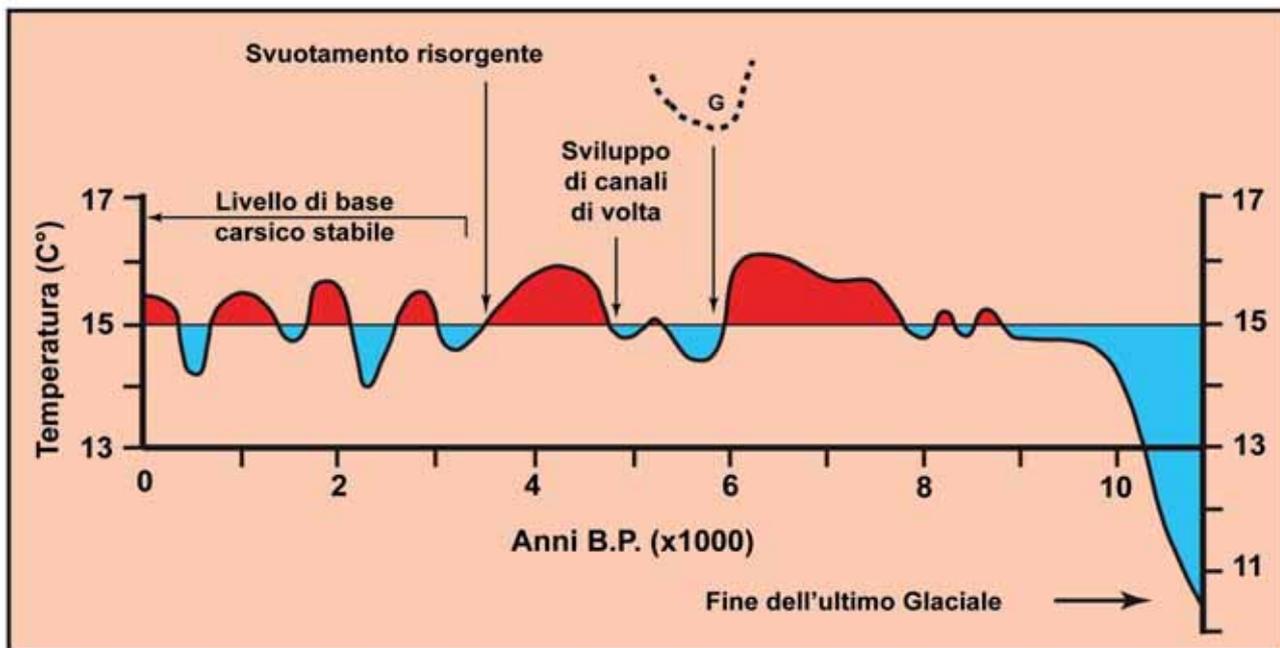


Fig. 10 – Diagramma delle variazioni delle temperature negli ultimi 11.000 anni in cui sono stati posizionati gli eventi di erosione/aggradazione che hanno interessato il complesso carsico del Re Tiberio (modificato da DANSGAARD *et alii* 1969).

5000 anni (MARABINI, VAI in questo stesso volume), ne consegue che la genesi della Risorgente possa essere precedente e che intorno ai 6000-5000 anni fa sia stata soggetta anch'essa ad aggradazione fluviale (fig. 10), di cui resta traccia nei canali di volta ancora visibili all'interno della piccola grotticella a livello 100 dietro il Silos della cava (fig. 16).

Qualche migliaio di anni dopo, tra 4000 e 3000 anni fa (età del Bronzo), l'alveo del Senio torna ad approfondirsi. In questo periodo l'uomo frequentava l'ingresso della Tana del Re Tiberio, a quota 173 m slm. Tale situazione, caratterizzata da modesti cicli di incisione e aggradazione, con una tendenza generale all'abbassamento dell'alveo, perdura fino ad oggi. L'ampia piana golenale oggi occupata dai Silos della cava (quota 100 m circa) è senza dubbio riferibile alla Piccola Era Glaciale (*Little Ice Age*) (450-150 anni fa) (MARABINI, VAI in questo stesso volume).

Oggi, processi antropici più che quelli naturali (*in primis* gli scavi in alveo non compensati dalle successive briglie, come quella alta 4 m sotto al ponte di accesso alla cava) hanno innescato una rapida erosione dell'alveo fluviale che raggiunge 94 m, mentre la galleria artificiale in cemento impedisce che il sistema carsico si metta in equilibrio.

Questa ricostruzione cronologica dell'evoluzione del complesso carsico di Monte Tondo e l'approfondimento della valle del fiume Senio consente una prima stima, seppur assolutamente approssimativa, della velocità di abbassamento del livello di base, che è ovviamente legato principalmente al sollevamento di questa parte dell'Appennino. Nelle prime fasi di sviluppo del carsismo, tra 150.000 e 70.000 anni fa circa, il tasso medio di erosione è stato di 2 mm/a, doppio rispetto al periodo post-MIS 4, si aprono quindi sviluppi veramente stimolanti di interpretazione geologica generale.

Ad esempio tale differenza, se confermata, potrebbe essere dovuta ad un cambio di regime tettonico, mostrando quindi un

rallentamento nel sollevamento di questa parte della Vena del Gesso negli ultimi 70.000 anni.

Ma è altrettanto e forse più plausibile pensare, stante la non trascurabile differenza di evoluzione morfologica e carsica tra i due periodi, anche a cause diverse, più locali e per così dire catastrofiche, quali il fatto che nel MIS 6, l'erosione regressiva del torrente Sintria dovrebbe aver causato la "cattura fluviale" del Senio (PICOTTI *et alii* 2009; MARABINI, VAI in questo stesso volume). In sintesi, non si può escludere che dopo il momento della "cattura" l'alveo del Senio abbia necessitato di diverse decine di migliaia di anni di erosione "accelerata" per raccordare il proprio profilo di equilibrio a quello più basso in quota del Sintria; si tenga presente che quest'ultimo non interseca direttamente la Vena del Gesso, in quanto utilizza il *graben*/corridoio marnoso-arenaceo di Zattaglia, a differenza del Senio che ha sempre dovuto "fare i conti" con la soglia gessosa e più resistente di Borgo Rivola.

Le forme ipogee nei gessi come indicatori ideali di eventi paleoclimatici e paleoambientali di breve durata

È oramai assodato che il carsismo in generale, e le concrezioni in particolare, sono tra i più sensibili e precisi indicatori paleoclimatici e paleoambientali (MCDERMOTT 2004). Uno dei problemi, però, che rende a volte poco utilizzabili i dati speleologici è quello del tempo che questi sistemi richiedono per mettersi in equilibrio con le mutate condizioni ambientali esterne. In assenza infatti di concrezionamento è necessario utilizzare le forme di erosione/corrosione, ma queste ultime, in ambiente carbonatico, possono impiegare anche varie decine di migliaia di anni a svilupparsi completamente (DREYBRODT *et alii* 2005) e pertanto non possono essere utilizzate per caratterizzare eventi la cui persistenza sia stata minore.

All'opposto, il carsismo in salgemma ha

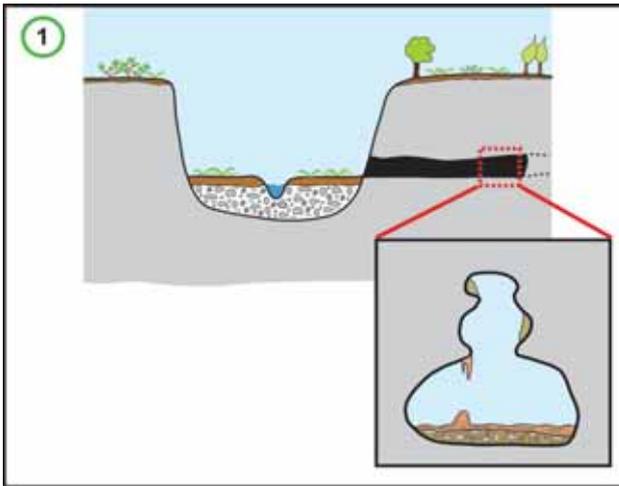


Fig. 11 – In una condizione di biostasia il livello di base carsico non subisce variazioni di rilievo, la porzione terminale della grotta è costituita da una galleria drenante a pelo libero col fondo di ciottoli fluitati, ricoperti da uno strato di concrezione calcarea. Vi saranno anche evidenti forme antigravitative esumate da un precedente periodo di maggiore o minore aggradazione. Numero 1 in fig. 16.

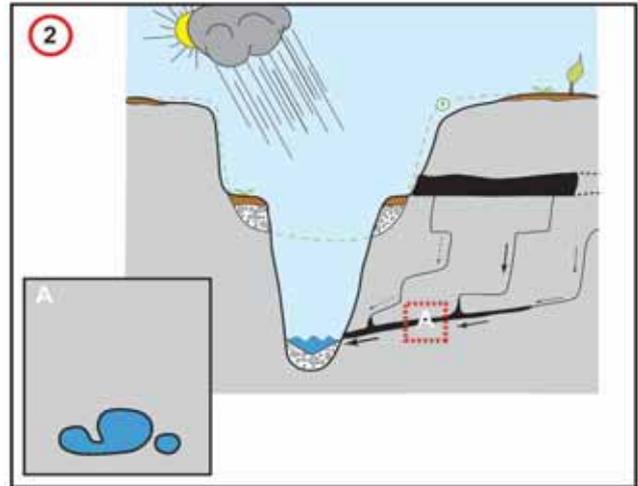


Fig. 12 – Ad un peggioramento climatico, con conseguente diminuzione della copertura vegetale e forte accelerazione dell'erosione fluviale, il sistema carsico risponde con l'evoluzione di gallerie (forre) fortemente inclinate e, inizialmente almeno, a pieno carico. Il processo procede dalle zone prossime all'esterno a quelle più all'interno. Numero 2 in fig. 16.

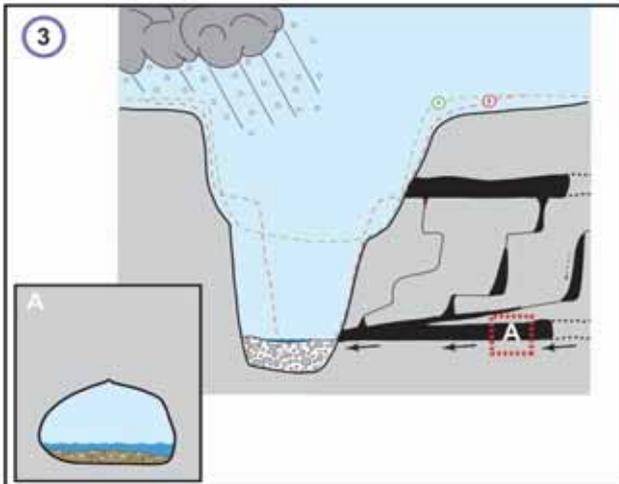


Fig. 13 – Una volta raggiunte condizioni classiche di resistasia, l'erosione è superiore alle capacità di smaltimento del fiume, pertanto il livello di base rimane costante. Si assiste quindi all'evoluzione di una nuova galleria suborizzontale parzialmente ingombra da ciottoli fluitati. Numero 3 in fig. 16.

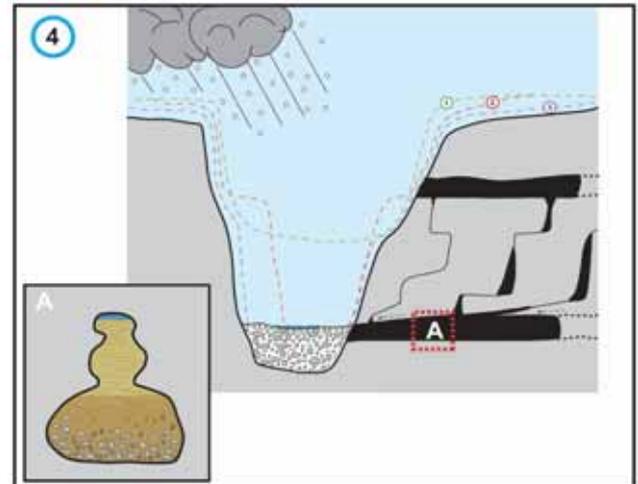


Fig. 14 – Col migliorare delle condizioni climatiche l'energia del fiume cala con conseguente progressiva aggradazione dei sedimenti e risalita del livello di base carsico. La galleria drenante viene riempita da sedimenti che inducono lo sviluppo di forme antigravitative (p.e. canali di volta). Numero 4 in fig. 16.

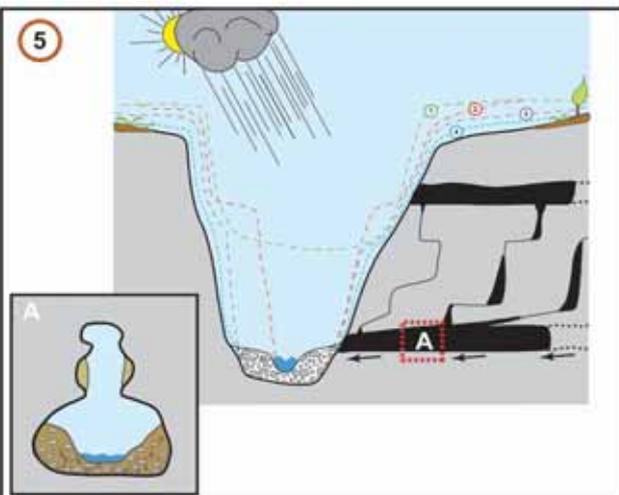


Fig. 15 – il calo di apporto solido conseguente allo sviluppo vegetale ripristina l'erosione fluviale, che induce una riattivazione della funzionalità idrica della galleria con progressiva erosione dei materiali fini. Numero 5 in fig. 16.

uno sviluppo talmente rapido che non appena cambiano le condizioni al contorno la stragrande maggioranza delle forme sviluppatesi precedentemente vengono distrutte e pertanto non ne viene conservata memoria (FRUMKIN, FORD 1995; DE WAELE *et alii* 2009).

I fenomeni carsici in gesso, invece, hanno un rapporto tra tempo di evoluzione e tempo di persistenza delle forme tale da risultare ideali per la definizione temporale degli eventi climatici e/o ambientali che ne hanno causato la loro evoluzione nel tempo.

Già da tempo infatti era noto che un sistema carsico in gesso poteva mettersi in equilibrio con un nuovo livello di base locale, sviluppando una nuova galleria di drenaggio lunga anche centinaia di metri, in un tempo relativamente breve (dell'ordine di qualche centinaia di anni o al massimo un migliaio di anni) (FORTI 2003).

Come detto nel capitolo precedente, lo studio di dettaglio del complesso carsico del Re Tiberio ha permesso di evidenziare come questo abbia risposto in maniera coerente a tutte le variazioni del livello di base carsico rappresentato dall'alveo del fiume Senio almeno negli ultimi 150.000 anni.

È però importante notare qui che il sistema carsico oltre che registrare puntualmente la variazione verticale del livello di base ha sviluppato forme erosive e sedimenti fisici e/o chimici peculiari per ogni singolo periodo climatico: in pratica la grotta nel suo complesso ha reagito in tempo reale alle variazioni climatiche esterne.

In particolare si è potuto osservare come, durante i periodi di "optimum climatico" (biostasia) come l'attuale, anche a causa della copertura vegetale, il fiume esterno incide solo parzialmente il suo alveo ma il livello di base carsico non subisce variazioni di rilievo, anche per la presenza di vegetazione che protegge il terrazzo fluviale dall'erosione. Pertanto la porzione terminale della grotta in gesso sarà una galleria drenante a pelo libero (fig. 11). Le gallerie drenanti suborizzontali sono an-

che oggetto di concrezionamento carbonatico, soprattutto a livello dell'alveo del torrente sotterraneo. La formazione di questi crostoni carbonatici, poi, è uno dei fattori fondamentali per cui le gallerie stesse non vengono ulteriormente erose. Infine il soffitto della galleria presenterà più o meno evidenti morfologie antigrafitative dovute ad un precedente periodo di maggiore o minore aggradazione.

Non appena si verifica un peggioramento del clima, con conseguente diminuzione di vegetazione e aumento delle precipitazioni, la risposta fluviale è di erosione accentuata con rapido approfondimento della valle e conseguente abbassamento del livello di base carsico. In queste condizioni il sistema non riesce a mettersi in equilibrio con il livello di base che varia troppo velocemente (fig. 12). Dalla preesistente galleria suborizzontale iniziano a formarsi gallerie fortemente inclinate intervallate da pozzetti verticali, che tendono a raccordarsi con il nuovo livello di base a partire da aree molto vicine alla precedente risorgente, per poi, mano a mano, spostarsi sempre più all'interno del massiccio carsico. La sezione di queste condotte, ancora non perfettamente gerarchizzate, è, almeno all'inizio, essenzialmente subcircolare, indice di uno scorrimento a pieno carico, per poi evolvere verso forme di *canyon* gravitativi. Un esempio perfetto di questo stadio è fornito dalle gallerie relitte incontrate dalla cava con le gallerie dei livelli 116 e 140 m s.l.m. (ERCOLANI *et alii* in questo stesso volume).

L'ulteriore peggioramento climatico che porta a condizioni classiche di resistasia, fa sì che l'erosione sia tale che il fiume non riesca più ad evacuare tutti i clasti dal suo letto che pertanto si amplia per erosione laterale, si alluviona e conseguentemente si stabilizza in quota (fig. 13). Queste condizioni sono perfette per permettere l'evoluzione di una nuova galleria suborizzontale che risulterà tanto più lunga quanto più queste condizioni saranno mantenute. Il flusso dell'acqua al suo interno sarà a pelo libero e il suo fondo parzialmente in-

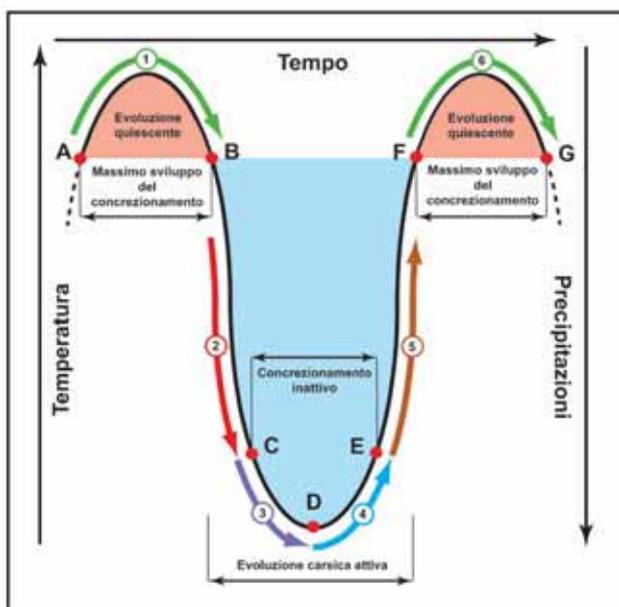


Fig. 16 – Processi morfologici attivi nelle grotte in gesso in funzione della fase climatica: i numeri sono riferiti alle situazioni descritte in figg. 11-15.



Fig. 17 – Un grande canale di volta interceettato da una galleria di cava.

gombri di ciottoli fluviali. La galleria iniziale della Tana del Re Tiberio ne è un esempio classico.

Nel momento in cui le condizioni climatiche iniziano a migliorare l'energia del fiume diminuisce e, considerata l'abbondanza di detriti disponibili anche per l'assenza di vegetazione, non è più in grado di mantenere costante il suo livello e si osserva una progressiva aggradazione dei sedimenti nel suo alveo (fig. 14). In queste condizioni il livello di base tende a risalire progressivamente all'interno della galleria drenante, con conseguente sedimentazione di materiali fini suo interno. La galleria quindi perde molta della sua funzionalità idraulica: queste sono le condizioni ideali per lo sviluppo di forme antigrafitative (o paragenetiche), quali i canali di volta, che in effetti sono praticamente ubiquitarie nei tratti suborizzontali del sistema carsico del Re Tiberio (PASINI 1967; 2009; 2012; FARRANT, SMART 2011).

Un ulteriore miglioramento climatico comporta un aumento della copertura vegetale e la minore disponibilità di materiale per il trasporto solido, conseguentemente il fiume esterno tende ad erodere i materiali alluvionali accumulati nello stadio 3 e 4 iniziando a creare un terrazzo (fig. 15). Parallelamente la funzionalità idrica nella galleria suborizzontale viene progressivamente ristabilita e pertanto i materiali fini, che hanno permesso l'evoluzione dei canali di volta, vengono progressivamente erosi. Dopo questo stadio il ciclo si chiude con il ripristino delle condizioni di biostasia che danno luogo ad un nuovo stadio 1 (fig. 11).

Ma questi stadi evolutivi, che si sono ciclicamente succeduti, per almeno 7 volte, all'interno del sistema carsico del Re Tiberio, possono in realtà essere considerati generali ed essere quindi riferiti, non tanto e non solo ad una determinata cavità in gesso, ma all'evoluzione normale del carsismo in questo litotipo. In effetti l'evoluzione subita da un sistema carsico in gesso nel passaggio da un optimum climatico a quello successivo può essere schematizza-

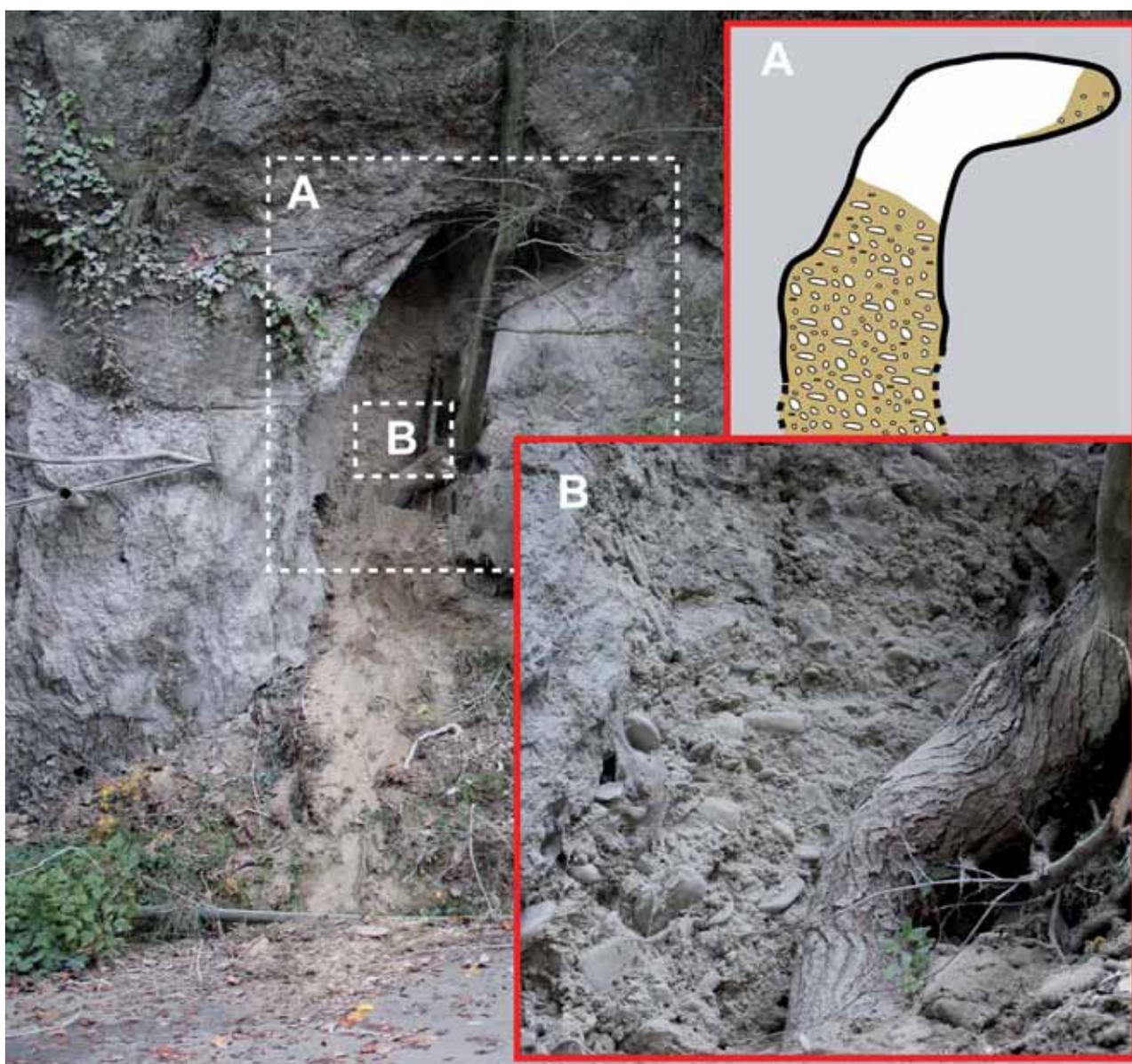


Fig. 18 – Piccola fenditura carsica a 101 m s.l.m., che si trova a poche decine di metri dalla galleria costruita nel 1958 sulla risorgente del sistema carsico, e che presenta un chiaro canale di volta (A) con al suo interno ancora quasi intatti i sedimenti fluviali di aggradazione (B), potenti oltre 4 metri e depositatisi tra i 6000 e 5.000 anni BP.

ta nei cinque stadi consecutivi appena descritti (fig. 16).

A prescindere da questo primo risultato generale, lo studio di dettaglio del complesso carsico del Re Tiberio ha anche permesso di appurare come alcune forme minori possano marcare fenomeni climatici esterni, durati poche decine o al massimo un paio di centinaia di anni, che ben difficilmente hanno lasciato altre chiare evidenze sia fuori che dentro la grotta.

È questo il caso dei canali di volta, che si sono dimostrati essere ubiquitari nelle grotte studiate, e che sono chiaramente correlati ai relativamente brevi periodi di

aggradazione che hanno seguito il picco massimo dell'erosione valliva. L'incisione del soffitto nelle varie porzioni suborizzontali ove queste gallerie antigrafitative (o paragenetiche) sono state osservate (fig. 17) varia da poche decine di centimetri a oltre 4-5 metri (fig. 18). Questa notevole differenza dimensionale anche tra canali di volta generati dallo stesso fenomeno di aggradazione sembra da ascrivere non tanto alla dimensione stessa del fenomeno di aggradazione, che ovviamente ha una sua rilevanza nel definire l'altezza massima a cui i canali di volta possono arrivare, ma piuttosto ad altri due fattori: il livello



Fig. 19 – Il grande frammento di concrezione di carbonato di calcio rinvenuto alla fine del 2012, durante i lavori di sbancamento a livello 330.

assoluto del soffitto preesistente e la distanza dall'esterno. Allo stato attuale dello studio, comunque, la scarsità dei dati a disposizione, non permette di illustrare in dettaglio questa ipotesi.

In un prossimo futuro, una campagna morfologica e dimensionale sui canali di volta sia nel complesso carsico del Re Tiberio, sia in altri sistemi carsici regionali in gesso, permetterà di verificare la teoria appena esposta.

Conclusioni

L'analisi morfologica effettuata sulle principali grotte sviluppatesi all'interno di Monte Tondo ha permesso di correlare i loro maggiori tratti orizzontali a periodi di stasi nell'approfondimento della valle del fiume Senio, che ha rappresentato il

livello di base locale per l'evoluzione carsica fino al 1958 quando la cava di gesso ha trasformato la risorgente del sistema in una galleria mineraria, fossilizzandola. È stato pertanto possibile indicare come primo importante stadio nello sviluppo speleogenetico del Re Tiberio la creazione della sua "galleria superiore" che è chiaramente correlata topograficamente ai depositi alluvionali dell'importante terrazzo fluviale a 219 m slm. Dato che a quei depositi è assegnabile una età di circa 110.000 anni fa (MARABINI, VAI in questo stesso volume) è evidente che tale età rappresenterebbe anche l'inizio dell'evoluzione della galleria superiore e pertanto si candida come "età minima" dell'intero sistema carsico: questo perché, per avere l'evoluzione di una grande galleria suborizzontale, è necessario che il drenaggio carsico nella zona superiore dell'affioramento sia

già ben funzionante e quindi in realtà l'età di partenza della carsificazione dei gessi di Monte Tondo è sicuramente molto precedente. Il recente ritrovamento in cava di un grosso frammento di concrezione a livello 330 m slm (fig. 19) sembra infatti supportare l'ipotesi che il sistema carsico facente capo al Re Tiberio avesse gallerie vadose anche a livelli molto più alti, che, nel tempo, sono stati completamente erosi. Tale concrezione, essendosi sviluppata per un periodo sicuramente estremamente lungo potrà in futuro anche permettere la definizione di una cronologia assoluta degli eventi che hanno interessato il sistema carsico sulla base di datazioni radiometriche.

In ogni caso anche solo considerando le gallerie ad oggi note è evidente che il sistema carsico del Re Tiberio è, di gran lunga, il più antico ancora attivo nei gessi messiniani dell'Emilia-Romagna.

Inoltre come conseguenza della correlazione proposta tra stadi isotopici marini e gallerie suborizzontali interne, poi, si è potuto dimostrare come nel caso specifico del complesso carsico del Re Tiberio, l'evoluzione è stata sufficientemente veloce da permettere il raggiungimento dell'equilibrio rispetto al livello di base carsico in alcune centinaia di anni o al massimo un migliaio di anni, e, per forme minori quali i canali di volta, in un tempo ancora molto inferiore.

Naturalmente, in un prossimo futuro, sarà necessario procedere con le datazioni radiometriche delle concrezioni esistenti all'interno del sistema, al fine di confermare e meglio definire le età delle singole porzioni del sistema.

Infine è stato possibile verificare sul campo come i canali di volta rappresentino costantemente il breve periodo di aggradazione successivo ad un massimo erosivo, e quindi ad un periodo freddo. Questo risultato non fa altro che confermare quanto già osservato in altre grotte della regione (FORTI 2003) e che cioè il carsismo in gesso, per la sua velocità di risposta alle condizioni al contorno, può essere considerato

un ottimo indicatore climatico e ambientale (DALMONTE *et alii* 2004; CALAFORRA *et alii* 2008) anche per intervalli di tempo molto piccoli.

Bibliografia

- J.M. CALAFORRA, P. FORTI, A. FERNÁNDEZ-CORTÈS 2008, *The speleothems in gypsum caves and their paleoclimatological significance*, "Environmental Geology" 53, 5, pp. 1099-1105.
- C. DALMONTE, P. FORTI, S. PIANCASTELLI 2004, *The evolution of carbonate speleothems in gypsum caves as indicators of microclimatic variations: new data from the Parco dei Gessi caves (Bologna, Italy)*, in P. FORTI (Ed.), *Gypsum Karst Areas in the World: their protection and tourist development*, (Mem. Ist. It. Spel., s. II, vol. 16), Bologna, pp. 65-82.
- W. DANSGAARD, S.J. JOHNSEN, J. MOLLER, C.C. JR. LANGWAY 1969, *One thousand centuries of climatic record from Camp Century on the Greenland ice sheet*, "Science" 166, pp. 377-381.
- J. DE WAELE 2010, *Speleogenesi del Complesso carsico Rio Stella-Rio Basino*, in P. LUCCI, P. FORTI (a cura di), *Il Progetto Stella-Basino*, (Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II, vol. 23), Bologna, pp. 95-108.
- J. DE WAELE, P. FORTI, A. ROSSI 2011, *Il Carsismo nelle Evaporiti dell'Emilia-Romagna*, in P. LUCCI, A. ROSSI (a cura di), *Speleologia e geositi carsici dell'Emilia-Romagna*, Bologna, pp. 25-59.
- J. DE WAELE, V. PICOTTI, L. ZINI, F. CUCCHI, P. FORTI 2009, *Karst phenomena in the Cordillera de la Sal (Atacama, Chile)*, in P.L. ROSSI (Ed.), *Geological constraints on the onset and evolution of an extreme environment: the Atacama Area*, "GeoActa", Special Publication 2, pp. 113-127.
- W. DREYBRODT, F. GABROVŠEK, D. ROMANOV

- 2005, *Processes of speleogenesis: a modelling approach* (Carsologica, Karst Research Institute), Postumia.
- M. ERCOLANI, P. LUCCI, B. SANSAVINI 2004, *Esplorazione dei sistemi carsici del Re Tiberio e dei Crivellari e salvaguardia dell'area di Monte Tondo (Vena del Gesso romagnola) interessata dall'attività di cava*, in P. FORTI (Ed.), *Gypsum Karst Areas in the World: their protection and tourist development*, (Mem. Ist. It. Spel., s. II, vol. 16), Bologna, pp. 143-154.
- F. FABBRI 2011, *Studio sedimentologico dei depositi dell'area archeologica della Grotta del Re Tiberio (Vena del Gesso) e loro significato paleoambientale*, Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Tesi di Laurea inedita in Scienze Geologiche, A.A. 2010-2011, 51 pp.
- A.R. FARRANT, P.L. SMART 2011, *Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and paragenesis*, "Geomorphology" 134, pp. 79-93.
- P. FORTI 2003, *I sistemi carsici*, in C. ELMI (a cura di), *La risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali nella pianura padana e veneto-friulana, nelle pianure minori e sulle coste nord- e centro-adriatiche*, in A. BIANCOTTI, M. MOTTA (a cura di), *Risposta dei processi geomorfologici alle variazioni ambientali*, Genova, pp. 246-251.
- P. FORTI, M. CHIESI 2000, *Idrogeologia, idrodinamica e meteorologia ipogea dei gessi di Albinea, con particolare riguardo al sistema carsico della Tana della Mussina di Borzano (ER-RE 2) (Albinea, Reggio Emilia)*, "Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia", s. II, vol. 11, Bologna, pp. 115-139.
- P. FORTI, S. MARABINI, G.B. VAI 1997 *Carta geologica dei dintorni della cava di gesso di Borgo Rivola*. Scala 1:2500, in *Convenzione con il comune di Riolo Terme sullo studio geologico, idrogeologico e carsico della porzione della Vena del Gesso romagnola interessata dalla cava di gesso di Borgo Rivola*, (Relazione preliminare, Bologna, 28 maggio 1997) (<http://www.venadelgesso.org/testi/cave/fortimarabinivai/cava5.htm>).
- P. FORTI, E. RABBI 1981, *The role of CO₂ in gypsum speleogenesis: I° contribution*, "International Journal of Speleology" 11, pp. 207-218.
- A. FRUMKIN, D.C. FORD 1995, *Rapid entrenchment of stream profiles in the salt caves of Mount Sedom, Israel*, "Earth Surface Processes and Landforms" 20, pp. 139-152.
- D. GARAVINI 1997, *Un torsolo di monte. Cava e grotte su Monte Mauro (Riolo Terme)*, "Speleologia Emiliana" s. IV, XXIII, 8, pp. 10-24.
- A. GHISELLI, M. MERAZZI, A. STRINI, R. MARGUTTI, M. MERCURIALI 2011, *Hypogeal geological survey in the "Grotta del Re Tiberio" natural cave (Apennines, Italy): a valid tool for reconstructing the structural setting*, "Central European Journal of Geosciences" 3 (2), pp. 155-168.
- GRUPPO SPELEOLOGICO "CITTÀ DI FAENZA", GRUPPO SPELEOLOGICO "VAMPIRO" 1964, *Le cavità naturali della Vena del Gesso tra il Lamone e il Senio*, Faenza.
- P. LUCCI, S. MARABINI 2010 *Trent'anni di speleologia nella Vena del Gesso*, in S. PIASTRA (a cura di), *Una vita dalla parte della natura. Studi in ricordo di Luciano Bentini*, Faenza, pp. 75-82.
- P. LUCCI, A. ROSSI (a cura di) 2011 *Speleologia e geositi carsici in Emilia-Romagna*, Bologna.
- F. McDERMOTT 2004, *Palaeo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review*, "Quaternary Science Reviews" 23, 7-8, pp. 901-918.
- M. MIARI 2007, *L'Eneolitico*, in C. GUARNIERI (a cura di) *Archeologia nell'Appennino romagnolo: il territorio di Riolo Terme*, Imola, pp. 30-33.
- C. NEGRINI 2007, *Re Tiberio*, in C. GUARNIERI (a cura di) *Archeologia nell'Appennino romagnolo: il territorio di Riolo Terme*, Imola, pp. 51-52.
- L. ORSINI 1907, *Imola e la Valle del Santerno*, Bergamo.

- G. PASINI 1967, *Nota preliminare sul ruolo speleogenetico dell'erosione antigravitativa*, "Le Grotte d'Italia" 4, 1, pp. 75-88.
- G. PASINI 2009, *A terminological matter: paragenesis, antigravitational erosion or antigravitational erosion ?*, "International Journal of Speleology" 38, 2, pp. 129-138.
- G. PASINI 2012, *Speleogenesis of the "Buco dei Vinchi" in- active swallow hole (Monte Croara karst sub-area, Bologna, Italy), an outstanding example of antigravitational erosion (or "paragenesis") in selenitic gypsum. An outline of the "post- antigravitational erosion"*, "Acta Carsologica" 41, pp. 15-34.
- V. PICOTTI, A. PONZA, F.J. PAZZAGLIA 2009, *Topographic expression of active faults in the foothills of the Northern Apennines*, "Tectonophysics" 474, pp. 285-294.
- G. SCARABELLI 1851, *Note sur l'existence d'un ancien lac dans la vallée du Senio en Romagne*, "Bulletin de la Société Géologique de France" 2, 8, pp. 239-251.
- G. SCARABELLI 1872, *Notizie sulla caverna del Re Tiberio. Lettera del Senatore G. Scarabelli al Chiarissimo Signor Professore Antonio Stoppani (Nella Seduta del 25 Febbraio 1872)*, "Atti della Società Italiana di Scienze Naturali" 14, pp. 3-20.
- M. TESSON, H.W. POSAMENTIER, B. GENSOUS 2000, *Stratigraphic Organization of Late Pleistocene Deposits of the Western Part of the Golfe du Lion Shelf (Languedoc Shelf), Western Mediterranean Sea, Using High-Resolution Seismic and Core Data*, "AAPG Bulletin" 84, 1, pp. 119-150.

Ringraziamenti: si ringraziano la Saint-Gobain PPC Italia S.p.A. per aver permesso l'accesso alle gallerie di cava; Massimo Ercolani e Baldo Sansavini per l'assistenza fornita durante le escursioni effettuate; lo Speleo GAM Mezzano per aver messo a disposizione tutto il materiale relativo all'area di studio.