

INTRA-MESSINIAN PALAEOKARST PHENOMENA REVEALED IN MESSINIAN GYPSUM QUARRIES IN EMILIA-ROMAGNA (ITALY)

FENOMENI DI PALEOCARSISMO INTRAMESSINIANO IN CAVE DI GESSO MESSINIANE DELL'EMILIA ROMAGNA (ITALIA)

CLAUDIO DALMONTE¹, JO DE WAELE¹, ELIANA FORNACIARI², GIANCARLO PASINI¹,
STEFANO VAIANI¹, CARLO CORREALE³ & FRANCESCO FABBRI³

Abstract

Karst in Emilia Romagna region (N-Italy) is mainly developed in Messinian gypsum rocks that outcrop on less than 1% of the regional territory.

The numerous epigenic caves that have been discovered in these rocks are believed to have formed in the last ten thousands of years, with some having started developing before the LGM. Remnants of the intra-Messinian karst cycle have been found in both open pit and underground quarries, at Monticino (Vena del Gesso) and Zola Predosa (West of Bologna) respectively. At Monticino quarry karstified fissures are filled with Upper Messinian sediments containing a rich association of vertebrates.

These animals lived on the emerged and karstified gypsum outcrops. At Zola Predosa, instead, a rather extensive cave system, now completely filled with sediments, confirms that this karst cycle has lasted long enough to enable the formation of well-developed underground karst networks. The Intra-Messinian karst cycle was active before the major tectonic events that have brought the gypsum ridges of Zola Predosa to incline for over 40°.

Keywords: speleogenesis in gypsum, karst cycle, evaporites, mine caves.

Riassunto

Il carsismo in Emilia-Romagna è principalmente sviluppato in rocce gessose messiniane, che affiorano su meno dell'1% del territorio regionale. Si ritiene che le numerose grotte epigenetiche che sono state scoperte in tali rocce si siano formate nelle ultime decine di migliaia di anni, e che alcune abbiano iniziato a svilupparsi prima dell'Ultimo Massimo Glaciale. Resti del ciclo carsico intra-messiniano sono stati scoperti sia in cave a cielo aperto che in gallerie di cava, rispettivamente a Monticino (Vena del Gesso) ed a Zola Predosa (ad Ovest di Bologna). A Monticino fessure carsificate sono riempite da sedimenti del Messiniano Superiore contenenti una ricca associazione di vertebrati terrestri tardo-messiniani. Questi animali vivevano su affioramenti gessosi emersi e carsificati. A Zola Predosa invece un sistema di grotte abbastanza esteso, ora completamente riempito da sedimenti, conferma che il suddetto ciclo carsico è durato abbastanza a lungo da consentire la formazione di reticoli carsici sotterranei ben sviluppati. Il ciclo carsico intra-messiniano fu attivo prima dei maggiori eventi tettonici che hanno fatto inclinare la dorsale gessosa di Zola Predosa di oltre 40°.

Parole chiave: speleogenesi nel gesso, ciclo carsico, evaporiti, grotte di cava.

¹ Italian Institute of Speleology, Department of Biological Geological and Environmental Sciences, Bologna University, Italy

² Dipartimento di Geoscienze, Padova University, Italy

³ Gruppo Speleologico Bolognese-Unione Speleologica Bolognese, Bologna, Italy

Introduction

Emilia Romagna region (N-Italy) is widely known for its epigenic caves developed in Messinian gypsum rocks.

These evaporites outcrop along the border of the northern Apennines occupying less than 1% of the regional territory, and are intensely karstified, their typical karstic morphologies being studied for almost a century (MARINELLI, 1917).

Almost 900 caves have been registered in the Emilia-Romagna regional cave catalogue, for a total development of around 90 km of passages (LUCCI & ROSSI, 2011).

The great majority of surface and underground karstic forms are related to the present-day karst cycle, that most probably started some ten thousands of years ago.

Until the 80s several gypsum areas were extensively mined in open pit quarries and underground.

Almost all these activities have stopped following the protests of environmental activity groups and the pressure of large parts of the population.

Most areas are now included in Regional Parks and are often designed as Special Protection Zones or Sites of Community Interest because of their high biodiversity. In several of these artificial outcrops, signs of older karst cycles have been discovered. Excavations in the filling of a fossil shaft intersected by a gypsum quarry immediately South of Bologna (*Cava a Filo*, area 3 in Fig.1) (PASINI, 1970) brought to the discovery of a Pleistocene mammal fauna of the Last Glacial (ca. 20 ky, MIS 2), as confirmed by C^{14} datings (PASINI, 1968). This karst cycle extended back at least to the penultimate glacial period (MIS 6; PASINI, 2012). Excavation of gypsum from the top of the ridges down to the river level has also allowed to reveal the complexity of some of the major cave systems, developed over a series of horizontal levels in an altitudinal range of more than 200 metres (e.g. *Re Tiberio* cave complex, *Vena del Gesso*, area 5 in Fig. 1).

The relationship between these cave levels and nearby river terraces confirms their age to be older than LGM, maybe as old as 100 ky.

Introduzione

La Regione Emilia - Romagna è ampiamente conosciuta per le sue grotte epigenetiche scavate nelle rocce gessose messiniane. Queste evaporiti affiorano lungo il bordo dell'Appennino Settentrionale, occupando meno dell'1% del territorio regionale, e sono intensamente carsificate; le loro tipiche morfologie carsiche sono state studiate da quasi un secolo (MARINELLI, 1917). Quasi 900 grotte sono state registrate nel catalogo regionale delle grotte emiliano-romagnole, per uno sviluppo totale di circa 90 km (LUCCI & ROSSI, 2011). La grande maggioranza delle forme carsiche superficiali e sotterranee sono dovute all'attuale ciclo carsico, che molto probabilmente iniziò alcune decine di migliaia di anni fa.

Fino agli anni '80 numerose aree gessose furono intensivamente sfruttate da cave, sia a cielo aperto che sotterranee. Quasi tutte queste attività estrattive sono cessate, in seguito alle proteste di gruppi ambientali ed alla pressione di ampie parti della popolazione. La maggior parte di tali aree è ora inclusa in Parchi Regionali e sono spesso designate come Zone di Protezione Speciale o Siti di Interesse Comunitario a causa della loro elevata biodiversità.

*Tracce di cicli carsici più antichi sono state scoperte in diversi affioramenti artificiali generati da cave. Scavi nel riempimento di un pozzo carsico fossile intersecato da una cava di gesso immediatamente a Sud di Bologna (*Cava a Filo*, area 3 in Fig.1) (PASINI, 1970) hanno portato alla scoperta di una fauna a mammiferi pleistocenica dell'Ultimo Glaciale (20 ka ca., MIS 2), come confermato da datazioni al C^{14} (PASINI, 1968). Questo ciclo carsico ebbe probabilmente inizio durante il Penultimo Glaciale (MIS 6, PASINI, 2012).*

*Escavazioni del gesso dai crinali fino al livello dei fiumi hanno permesso di rivelare la complessità di alcuni dei maggiori sistemi di grotte, sviluppati in serie di livelli orizzontali in un intervallo altitudinale di più di 200 m (ad es. il complesso di grotte di *Re Tiberio*, *Vena del Gesso*, area 5 in Fig. 1). Le relazioni altimetriche tra questi livelli di grotte ed i vicini terrazzi fluviali confermano che la loro età è più antica dell'Ul-*

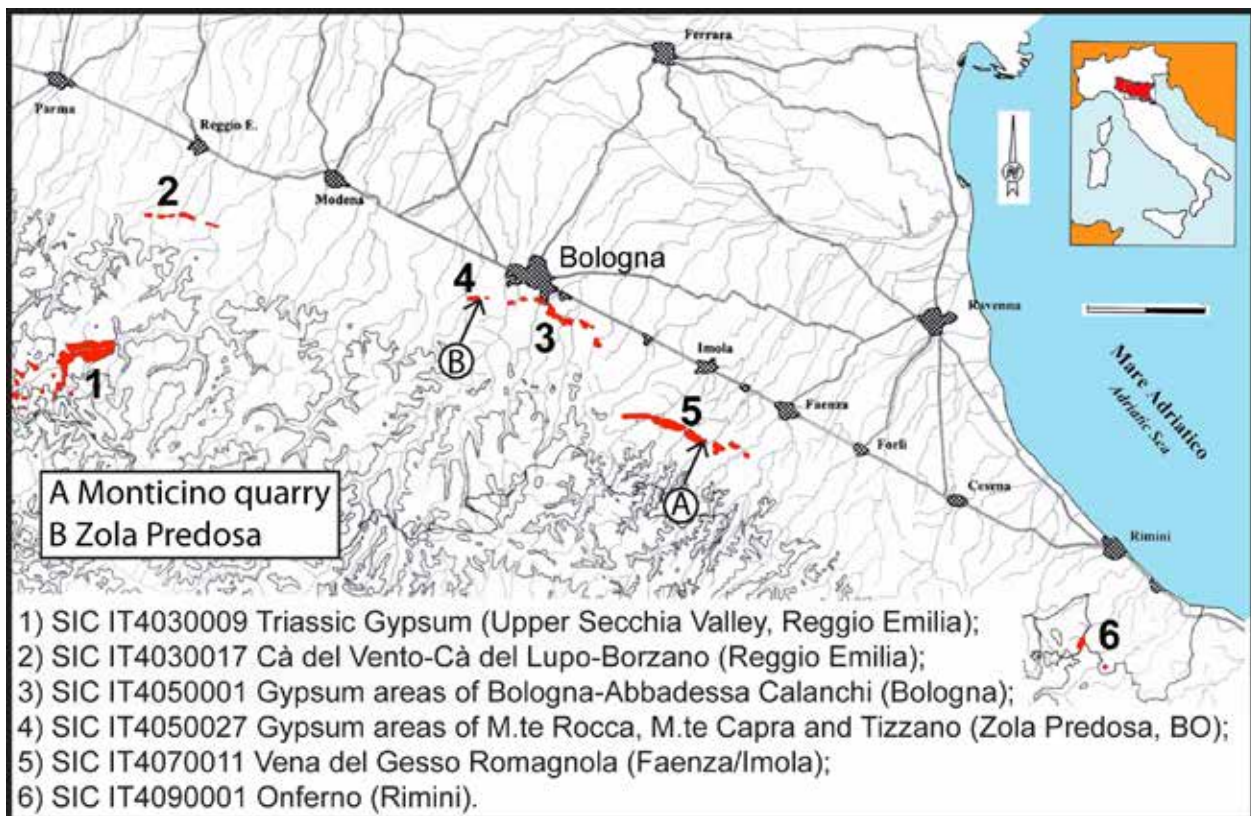


Fig. 1 - Triassic (1) and Messinian gypsum outcrops (2 to 6) in Emilia Romagna Region (N-Italy). / *Affioramenti gessosi triassici (1) e messiniani (2 - 6) in Emilia-Romagna.*

But gypsum quarries have also revealed an even older karst cycle, of intra-Messinian age. This paper describes these oldest palaeokarsts, one of which can truly be classified as a “mine cave”.

Geological background

The Messinian Salinity Crisis (MSC) is one of the world's most studied catastrophic geological events (CLAUZON *et alii*, 1996; KRIJGSMAN *et alii*, 1999).

The MSC is subdivided in: a preevaporitic phase (7.251-5.96 Ma), with typical euxinic organic-rich deposits; shallow water evaporites known as the Lower Evaporites (5.96-5.60 Ma); post-evaporitic non-marine deposits, the Upper Evaporites (5.60-5.33 Ma) also known as *Lago Mare* (ROVERI & MANZI, 2006). The Lower Evaporites, also known as Primary Lower Gypsum (LUGLI *et alii*, 2010), are characterised by an alternation of gypsum beds and marls.

They are well represented in the Emilia-Romagna region (N-Italy), and crop out in several more or less small fragments

timo Massimo Glaciale, e che forse è di 100 ka. Ma le cave di gesso hanno anche rivelato un ciclo carsico ancor più antico, di età intra-messiniana. Questo articolo descrive tale paleocarsio intra-messiniano, una delle cui manifestazioni può senza dubbio essere classificata come “grotta di miniera”.

Inquadramento geologico

La Crisi di Salinità Messiniana (MSC) è uno degli eventi geologici catastrofici più studiati del mondo (CLAUZON et alii, 1996; KRIJGSMAN et alii, 1999). La MSC è suddivisa in: una fase preevaporitica (7.251-5.96 Ma), con tipici depositi eusini ricchi di materia organica; evaporiti di acque poco profonde, note come Lower Evaporites (5.96-5.60 Ma); depositi post-evaporitici non marini, le Upper Evaporites (5.60-5.33 Ma), note anche come depositi di Lago Mare (ROVERI & MANZI, 2006). Le Lower Evaporites, note anche come Primary Lower Gypsum (LUGLI et alii, 2010), sono caratterizzate da un'alternanza di strati gessosi e marnosi, sono ben rappresentate in

along the northern border of the Apennines (Fig. 1).

Monticino Quarry

In the Monticino Quarry (area 5 in Fig. 1) the most important sedimentary formations of the western Romagna region crop out, from bottom to top: the *Marnoso-Arenacea* Fm. (Langhian-Tortonian), the *Ghioli di Letto* (Tortonian-Lower Messinian), the *Gessoso-Solfifera* Fm. (Messinian), the *Colombacci* Fm. (Upper Messinian), and the *Argille Azzurre* Fm. (Pliocene-Lower Pleistocene) (MARABINI & VAI, 1989).

The *Gessoso-Solfifera* Fm. is composed of the typical macrocrystalline gypsum beds belonging to the Lower Evaporites (LUGLI *et alii*, 2010).

Immediately after the deposition of these Lower Evaporites, an Intra-Messinian tectonic phase folded and uplifted these gypsum beds that were exposed for around 100 ky to the atmosphere. This short exposure was long enough to allow dissolution of the gypsum rocks and the formation of widened cracks.

These karst features were then filled with the *Colombacci* Fm. sediments.

Zola Predosa

At Zola Predosa (area 4 in Fig. 1) Messinian gypsum beds (Primary Lower Gypsum, LUGLI *et alii*, 2010) crop out over a length of 1.5 kilometres, reaching their maximum thickness of 300 metres in the central part of the outcrop. The evaporites are composed of mostly thick selenite layers interbedded with more or less thin marly sediments. They cover Miocene fine-grained sediments ranging in age from Langhian to Lower Messinian. The evaporitic sequence is overlain by Upper Messinian and Pliocene clays and marls (MARTELLI *et alii*, 2008).

The gypsum beds have a general ENE-WSW orientation dipping more or less regularly to the NNW, with angles ranging between 40° and 47° (MARTELLI *et alii*, 2008). There are three main fault systems in the area: N-S and NW-SE faults (anti-apennine faults) and extensional E-W faults (apennine faults). As for the *Vena*

Emilia-Romagna, ed affiorano in diversi frammenti più o meno piccoli lungo il margine settentrionale dell'Appennino (Fig. 1).

La Cava di Monticino

Nella Cava di Monticino (area 5 in Fig. 1) affiorano le più importanti Formazioni sedimentarie della Romagna occidentale, dal basso verso l'alto: la Formazione *Marnoso-Arenacea* (Langhiano-Tortoniano), la Formazione dei *Ghioli di Letto* (Tortoniano - Messiniano inferiore), la Formazione *Gessoso-Solfifera* (Messiniano), la Formazione a *Colombacci* (Messiniano superiore) e la Formazione delle *Argille Azzurre* (Pliocene-Pleistocene inferiore) (MARABINI & VAI, 1989).

La Formazione *Gessoso-Solfifera* è costituita dai tipici strati gessosi macrocristallini appartenenti alle Lower Evaporites (LUGLI *et alii*, 2010). Immediatamente dopo la deposizione di queste rocce una fase tettonica intra-messiniana piegò e sollevò questi strati gessosi, che perciò rimasero esposti agli agenti atmosferici per circa 100 ka. Questa breve esposizione fu lunga abbastanza da consentire l'allargamento per dissoluzione di fratture delle rocce gessose. Tali forme carsiche furono poi riempite dai sedimenti della Formazione a *Colombacci*.

La Cava di Zola Predosa

A Zola Predosa (area 4 in Fig. 1) affiorano strati gessosi messiniani (Primary Lower Gypsum, LUGLI *et alii*, 2010) per una lunghezza di 1,5 km, raggiungendo il loro massimo spessore (300 m ca.) nella parte centrale dell'affioramento. Le evaporiti sono costituite da strati selenitici prevalentemente spessi, intercalati da strati marnosi più o meno sottili. Questi strati ricoprono sedimenti miocenici a grana fine, aventi un'età che va dal Langhiano al Messiniano inferiore. La sequenza evaporitica è sovrastata da argille e marne del Messiniano superiore e del Pliocene (MARTELLI *et alii*, 2008).

Gli strati gessosi hanno generalmente direzione ENE-OSO e immergono più o meno regolarmente verso NNO, con pendenze tra i 40° ed i 47° (MARTELLI *et alii*, 2008). In quest'area ci sono tre principali sistemi

Fig. 2 - Karst fissures in Monticino quarry (near Brisighella, Ravenna) filled with Colombacci Fm. fine sediments. / *Piccole cavità carsiche nella Cava Monticino (presso Brisighella, Ravenna) riempite da sedimenti fini della Formazione a Colombacci.*

del Gesso area (area 5 in Fig.1), the most important tectonic phases are believed to be two: Late-Messinian (first major tilting phase) and Middle to Late Pliocene - Quaternary (transversal faults and second tilting) (MARABINI & VAI, 1985).

Intra-Messinian palaeokarsts Monticino Quarry

Until recently the only witness of a karst cycle much older than the ones formed in the last thousand years in Emilia Romagna was the one discovered in 1985 in a gypsum quarry near Brisighella (Monticino Quarry, *Vena del Gesso Romagnola*), around 45 km SE of Bologna. Excavations revealed many small widened fissures filled with sediments that contained a rich association of Late-Messinian terrestrial vertebrates (COSTA *et alii*, 1986) (Fig. 2). Over 60 species of animals have been described from this exceptional paleontological site, comprising rhinoceros, monkeys, hyena, antilopes, snakes, anteater and other species typical of the present African savana environment. These large mammals lived here during the final phases of the Messinian. These small karst voids are thus what is left of an intra-Messinian continental period, during which some parts of the gypsum rocks were exposed to the atmosphere, enabling the formation of caves. However, in this case no real cave system has been found, but only metric fissures and cracks widened by dissolution, resembling a sort of karstic palaeo-surface.

Zola Predosa

In 2010 signs of this intra-Messinian karst phase have been discovered also 10 km West of Bologna (Zola Predosa) (DALMONTE *et alii*, 2012; DE WAELE & PASINI, 2013). In the gypsum outcrop near Zola Predosa an active (Holocene) cave system with a



di faglie: faglie con direzione N-S, NO-SE (faglie anti-appenniniche) e faglie di distensione con direzione E-O (faglie appenniniche). Per quanto concerne la Vena del Gesso (area 5 in Fig.1), si ritiene che le fasi tettoniche più importanti siano state due: una fase tardo-messiniana (prima e più importante fase di tilting), ed una seconda fase che va dal Pliocene medio al Tardo Pliocene-Quaternario (faglie trasversali e secondo tilting) (MARABINI & VAI, 1985).

Paleocarso Intra-Messiniano Cava Monticino

*Fino a poco tempo fa la sola testimonianza di un ciclo carsico molto più antico di quelli sviluppatisi nelle ultime migliaia di anni in Emilia-Romagna era quello scoperto nel 1985 in una cava di gesso vicino a Brisighella (Cava Monticino, Vena del Gesso Romagnola), circa 45 km a SE di Bologna. I lavori di cava lì effettuati misero alla luce molte piccole fessure nei gessi allargate dalla dissoluzione carsica; tali fessure erano riempite da sedimenti che contenevano una ricca associazione di vertebrati terrestri tardo-messiniani (COSTA *et alii*, 1986) (Fig. 2). Sono state descritte oltre 60 specie di animali provenienti da questo eccezionale sito paleontologico, tra cui rinoceronti, scimmie, iene, antilopi, formichieri, serpen-*

length of over 2 kilometres is known since the early 30s (BERTOLANI & ROSSI, 1972). This cave, the “*Grotta Michele Gortani*”, develops in an ENE-WSW direction, following the strike of the gypsum strata and paralleling a nearby quarry tunnel. The *Grotta Michele Gortani* is composed of more or less horizontal vadose passages, developed along several superimposed levels and characterised by both coarse and fine grained sediments of recent origin. At the moment there is no physical connection between the active cave and the quarry tunnel, although they are separated by only a few metres (Fig. 3).

The active cave has also no signs whatsoever of palaeokarstic conduits filled with more or less lithified sediments.

Inside the quarry tunnel, instead, several karstic conduits, completely filled with sediments, have been discovered only a

ti ed altre forme tipiche dell'attuale savana africana. Questi mammiferi vivevano - ovviamente in condizioni subaeree - nella zona della Cava Monticino durante la fase terminale del Messiniano. Le piccole fessure carsificate suddette sono perciò anch'esse la testimonianza di un periodo continentale intra-messiniano, durante il quale alcuni lembi dei gessi furono esposti all'atmosfera, consentendo lo sviluppo di fenomeni carsici. Comunque alla Cava Monticino non è stato rinvenuto nessun sistema di grotte, ma - come si è detto - solo fessure di dimensioni metriche allargate dalla dissoluzione fisica, che individuano una sorta di paleosuperficie carsica.

Zola Predosa

Tracce della fase carsica intra-messiniana sono state scoperte pochi anni fa anche 10 km ca. ad Ovest di Bologna (Zola Predosa)

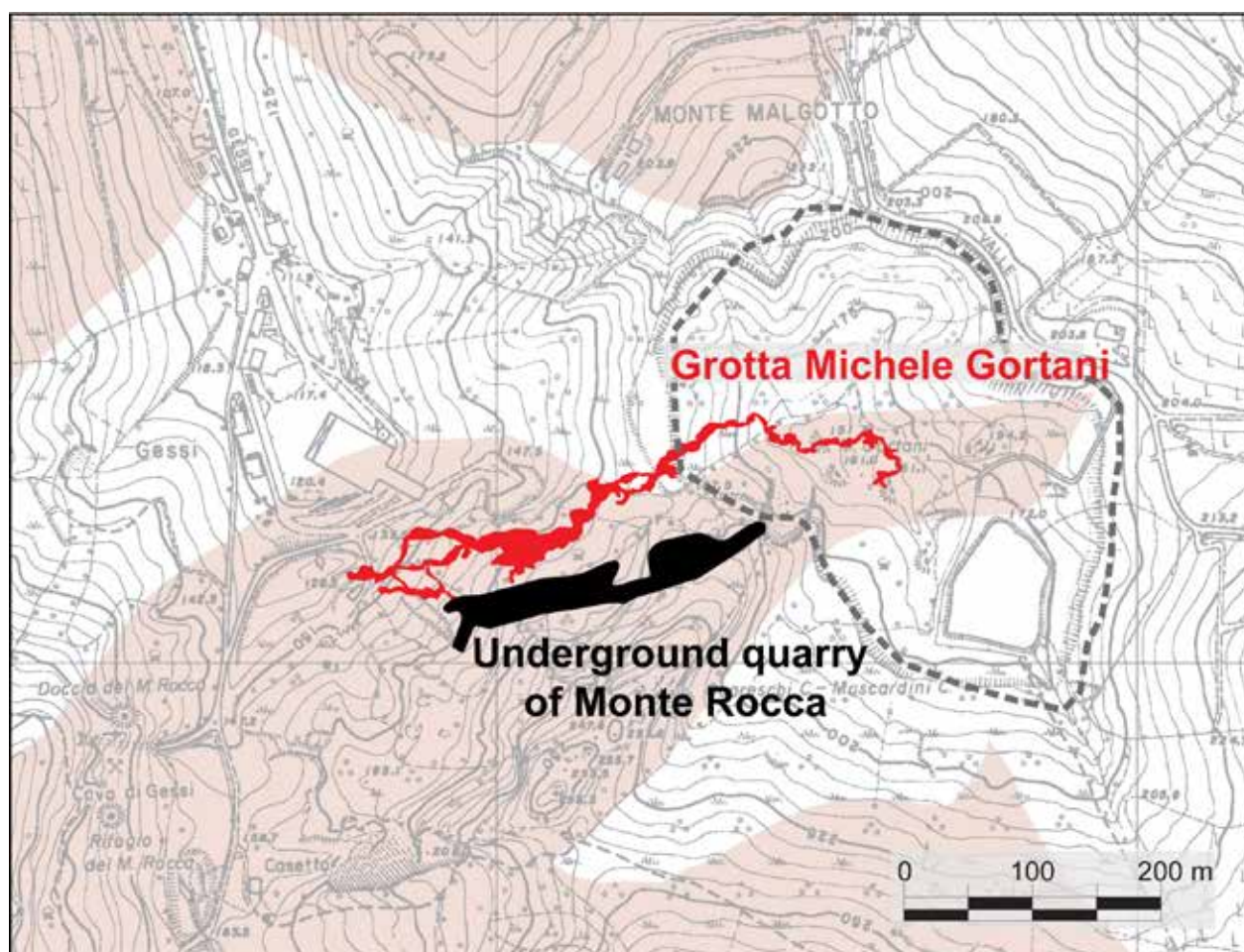


Fig. 3 - Location sketch of the *Grotta Michele Gortani* (red) and the Monte Rocca underground gypsum quarry that intercepted the “*Grotta di Monte Rocca*” (see Figure 5 for details). / *Schizzo dell'ubicazione della Grotta Michele Gortani (in rosso) e della cava sotterranea di Monte Rocca (in nero), che ha intercettato la Grotta di Monte Rocca (per ulteriori dettagli v. Fig. 5).*

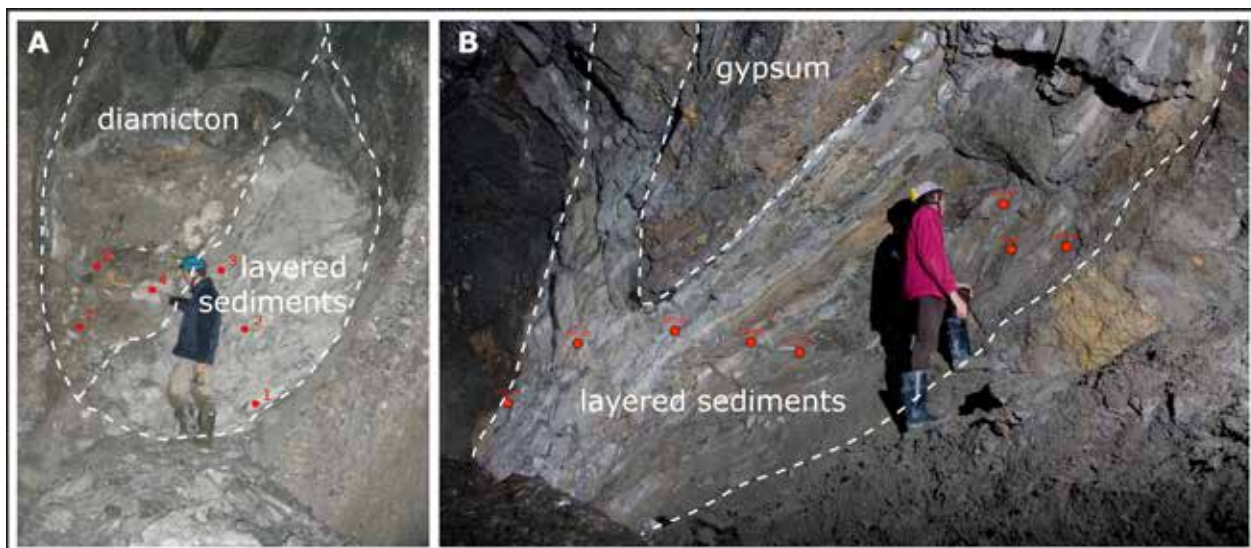


Fig. 4 - Palaeokarstic phreatic conduit, called “Galleria dei Quattro”, intercepted in the final part of the Monte Rocca quarry’s tunnel (D-E in Fig. 5). A. Portion of the elliptical conduit exposed on the western wall (D in Fig. 5); left a diamicton layer, about 1.7 m thick, is visible; B. Filling of the larger portion of the same conduit displayed along the eastern wall (E in Fig. 5). Red dots show sampling sites for nannoplankton and foraminifera analyses. Person for scale. / *Condotto freatico paleocarsico, denominato Galleria dei Quattro, intersecato dal tunnel della cava di Monte Rocca nel suo tratto terminale (D-E in Fig. 5). A. Porzione del condotto a sezione trasversale ellittica esposto nella parete occidentale del tunnel (D in Fig. 5); a sinistra è visibile uno strato di diamicton, dello spessore di 1,7 m ca.; B. Riempimento della porzione più ampia dello stesso condotto, visibile nella parete orientale del tunnel (E in Fig. 5). I punti rossi sono quelli da cui sono stati prelevati i campioni per lo studio dei foraminiferi e del nannoplancton.*

few years ago. The most important of these conduits, and also the first that has been discovered, is located at the end of the quarry tunnel, where an elliptical, 4 x 5 metres wide tube is completely filled with indurated sediments (Fig. 4).

This fragment of cave has been called “Galleria dei Quattro”. Other canyon-like passages, up to 1 metre wide, can be seen along the quarry tunnel, and most of these are filled with similar sediments.

These fragments of filled cave are what is left of an extensive and well-developed cave system with a mixture of both phreatic and vadose morphologies, now completely fossilised. This cave system has been called

(DALMONTE et alii, 2012; DE WAELE & PASINI, 2013). *Fin dai primi anni '30 (BERTOLANI & ROSSI, 1972) nell'affioramento gessoso presso Zola Predosa è noto un sistema di grotte olocenico, attivo, avente una lunghezza di oltre 2 km. Questo sistema ipogeo, la “Grotta Michele Gortani”, si sviluppa in direzione ENE-OSO, parallelamente alla direzione degli strati gessosi ed a quella di un adiacente tunnel di cava. La Grotta Michele Gortani è costituita da gallerie vado-se più o meno orizzontali, sviluppate in diversi livelli sovrapposti e caratterizzate da sedimenti di origine recente, sia grossolani che fini. Attualmente non c'è alcun collegamento tra la grotta attiva ed il tunnel della cava, benché essi siano distanti solo pochi metri (Fig. 3). La grotta attiva non mostra alcuna traccia di condotti paleocarsici riempiti da sedimenti più o meno litificati. All'interno del tunnel di cava, invece, sono stati scoperti nel 2010 diversi condotti carsici completamente riempiti da sedimenti. I più ampi di questi condotti sono ubicati presso l'estremità occidentale del tunnel di cava, dove si trova una galleria freatica a sezione trasversale ellittica delle dimensioni di 4 x 5 metri, completamente riempita da sedimenti litificati (Fig. 4); questa galleria (la prima che fu scoperta) è stata chiamata “Galleria dei Quattro”. Altre gallerie, simili a canyon, larghe fino ad 1 metro, si possono osservare lungo il tunnel della cava di gesso, e quasi tutte sono riempite da sedimenti simili. Questi tratti di grotta occlusa da sedimenti sono ciò che resta di un*

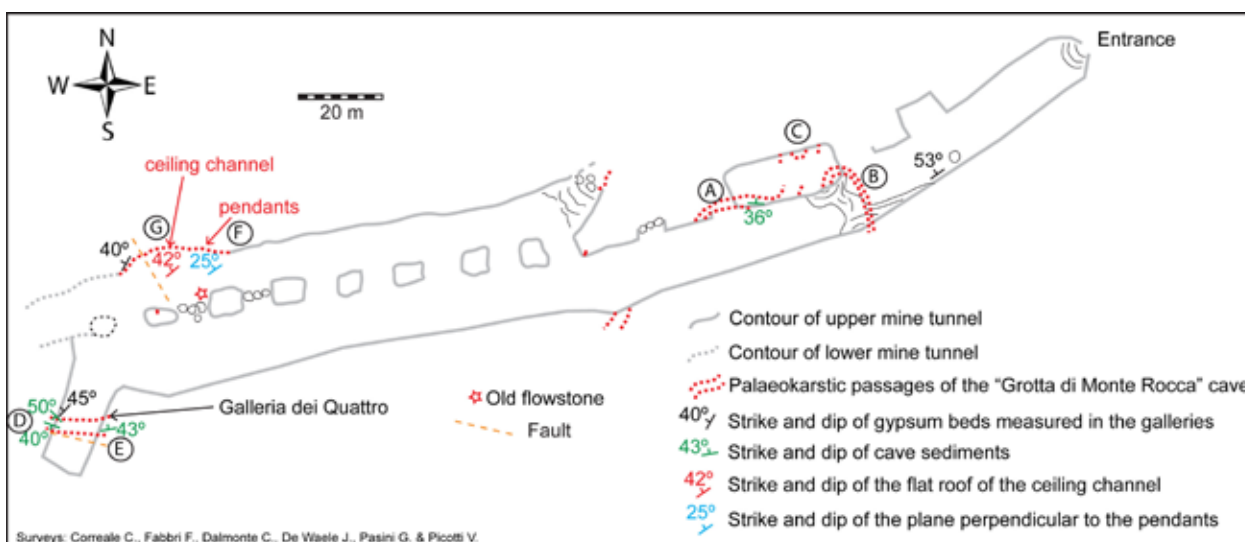


Fig. 5 - Part of the Monte Rocca underground gypsum quarry and the intercepted palaeokarst speleofoms, all belonging to the “Grotta di Monte Rocca” palaeocave. / Parte della cava sotterranea di gesso di Monte Rocca (Zola Predosa, Bologna); sono indicate le speleoforme paleocarsiche intersecate dalla cava, tutte appartenenti alla paleogrotta di Monte Rocca.

“Grotta di Monte Rocca”. Today around 80 metres of filled conduits can be seen along the quarry walls, and it is easy to estimate the total cave length in several hundreds of metres (Fig. 5).

The sediment fill is mostly characterised by an alternation of more or less lithified clays, silts and gypsum sands. The disposition of the layers, with lenses of coarse sands interfingered with finer grained sediments, allows to identify them as a cave stream deposit.

This fill sometimes englobes blocks of gypsum or other sediments, probably brought into the cave by collapses and/or mass movements.

One of the present authors (V.S.C.) studied the foraminifera of some samples (ASS 100 - 107) collected from fine sediments of the fill: they are reworked Langhian and Serravallian microfossils.

Another of the present authors (F.E.) studied the calcareous nannoplankton of other samples of the fill (ASS 1, 2, 3, 4, 7, 8), which results to be reworked as well: we have to do with nannofossils Serravallian - Lower Tortonian in age. The source origin of these sediments can easily be explained by local outcroppings of Middle Miocene and Tortonian rocks at the surface. The layers

esteso e ben sviluppato sistema ipogeo con condotti freatici e vadosi, ora completamente fossilizzati. Questo sistema ipogeo è stato chiamato “Grotta di Monte Rocca”. Attualmente si possono vedere lungo le pareti del tunnel di cava circa 80 metri di condotti riempiti, ed è presumibile che lo sviluppo totale della Grotta di Monte Rocca fosse di diverse centinaia di metri (Fig. 5).

Il riempimento sedimentario è prevalentemente caratterizzato da un’alternanza di argille, silt e sabbie gessose, più o meno litificati. Gli strati presentano lenti di sabbie grossolane interdigitate a sedimenti a grana più fine, e ciò consente di identificarli come depositi di un torrente sotterraneo. Questo riempimento ingloba talora blocchi di gesso e di altre rocce sedimentarie, probabilmente introdotti nella grotta da crolli e/o da movimenti di massa.

Uno degli autori (V.S.C.) ha studiato i foraminiferi di alcuni campioni (ASS 100 - 107) raccolti dai sedimenti fini del riempimento: essi sono microfossili Langhiani e Serravalliani rimaneggiati. Un altro autore (F.E.) ha studiato il nannoplancton calcareo di altri campioni del riempimento (ASS 1, 2, 3, 4, 7, 8: i nanofossili sono di età Serravalliana-Tortoniana inferiore, e sono anch’essi rimaneggiati). L’origine di questi

of the cave sediments have an inclination ranging between 35° and 45° towards the NE, while the Messinian gypsum beds are slightly steeper and immerse in the same direction.

This observation suggests the idea that the cave sediments were originally sub-horizontal, and were deposited prior to the steep inclination of the whole Messinian gypsum sequence.

They were almost certainly deposited during the final stage of the Messinian, before the Pliocene-Quaternary uplift. This would give this palaeokarst a Late Messinian age.

A stretch of the *Grotta di Monte Rocca* near its western end (point G in Fig. 5) is free of sediments: the filling was removed by the quarry works.

This stretch reveals a well-developed ceiling channel with flat roof, classified as a *post-antigravitative ceiling channel* (PASINI, 2012, p. 24) formed after the end of the antigravitative erosion process (or “paragenesis”: FARRANT & SMART, 2011; PASINI, 2009).

This speleoform had originally a subhorizontal roof (PASINI, 2012, p. 24).

Yet the flat roof of the *Grotta di Monte Rocca* ceiling channel is now not sub-horizontal, but has an inclination of 42° toward the NNW, similar to the one of the nearby gypsum beds, that have an inclination of around 40° in the same direction (Fig. 6a). The post-antigravitative ceiling channel was thus formed after the end of the deposition of the Primary Lower Gypsum beds, dated at 5.61 Ma BP (LUGLI *et alii*, 2010), and before the Middle Pliocene-Late Pliocene-Quaternary tectonic phase.

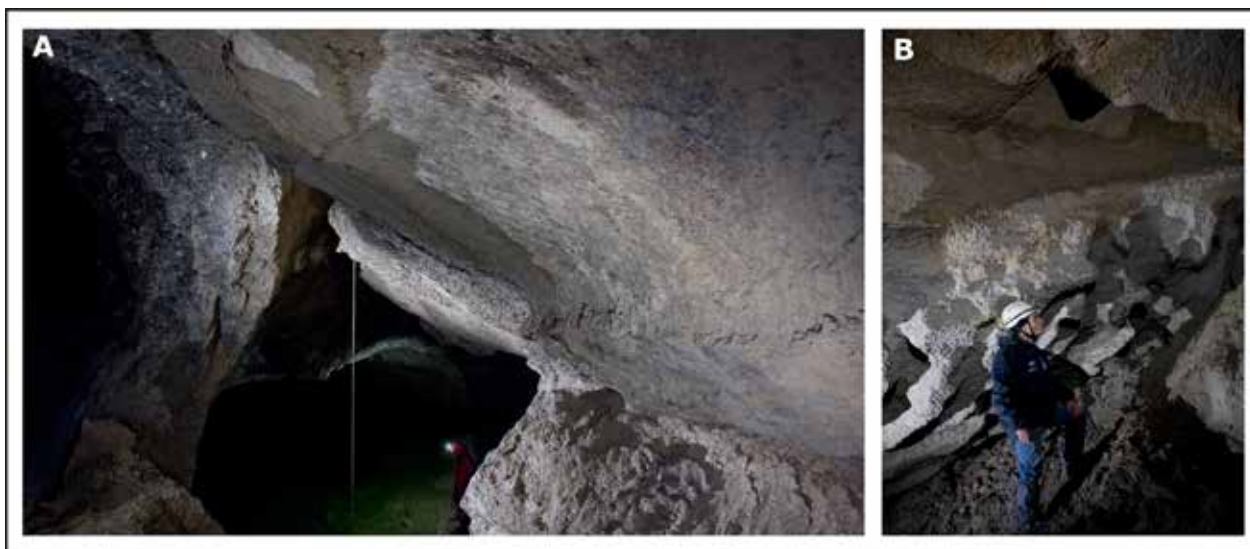
Closeby there are also pendants separated by decimetre wide anastomoses (point F in Fig. 5), with their axes forming angles of about 25° with the vertical line (Fig. 6b); the plane perpendicular to the pendants axes is inclined nearly 25° toward NW.

This means that these pendants underwent a rotation of about 25°, which is 15°-18° less than the one which involved the gypsum layers, the filling of the “*Galleria dei Quattro*” and the post-antigravitative ceiling channel.

micro- e nannofossili può essere facilmente spiegata dalla presenza di affioramenti locali di rocce del Miocene medio e del Tortoniano.

Gli strati dei sedimenti di grotta (riempimento) hanno una pendenza che va da 35° a 45° verso NE, mentre gli strati gessosi messiniani sono leggermente più ripidi ed immergono nella stessa direzione. Questa osservazione suggerisce l'idea che i sedimenti di grotta fossero originariamente sub-orizzontali, e che si siano depositi prima della forte inclinazione dell'intera sequenza gessosa messiniana. Essi si depositarono quasi sicuramente durante la fase terminale del Messiniano, prima del sollevamento Pliocenico-Quaternario. Ciò assegnerebbe al paleocarso in questione un'età tardo-messiniana.

*Un tratto della Grotta di Monte Rocca in prossimità della sua estremità occidentale (punto G in Fig. 5) è libero da sedimenti: il riempimento è stato rimosso dai lavori di cava. In questo tratto è visibile un canale di volta ben sviluppato con soffitto piatto, classificabile come post-antigravitative ceiling channel (PASINI, 2012, p. 24), formatosi dopo la cessazione del processo di “erosione antigravitativa” (o “paragenesi”: FARRANT & SMART, 2011; PASINI, 2009). Questa speleoforma aveva in origine un soffitto necessariamente sub-orizzontale (PASINI, 2012, p. 24). Tuttavia il soffitto piatto del canale di volta della Grotta di Monte Rocca ora non è sub-orizzontale, ma ha un'inclinazione di 42° verso NNO, simile a quella degli strati gessosi contigui (che hanno un'inclinazione di circa 40° nella stessa direzione; Fig. 6a). Il post-antigravitative ceiling channel si formò perciò dopo la fine della deposizione degli strati del Primary Lower Gypsum - datata a 5,61 Ma BP (LUGLI *et alii*, 2010) -, e prima della fase tettonica che va dal Pliocene medio al Tardo Pliocene-Quaternario. In prossimità del ceiling channel ci sono anche pendenti - separati da anastomosi larghe circa un decimetro (punto F in Fig. 5) -, con assi di allungamento formanti angoli di circa 25° con la verticale (Fig. 6b); il piano perpendicolare agli assi di allungamento dei pendenti è inclinato di circa 25° verso NO. Ciò significa che questi pendenti*



These pendants appear thus to be younger than the “*Galleria dei Quattro*”, its filling and the ceiling channel, and they formed when the “*Grotta di Monte Rocca*” was already inclined by the tectonic movements of 15°- 18°. This also means that in the “*Grotta di Monte Rocca*” at least two phases of antigravitative erosion, separated by a long time interval, took place.

Discussion and Conclusions

In 1985 excavations in the Monticino Quarry (Brisighella, Ravenna) revealed for the first time an intra-Messinian karst phase, evidenced by small dissolution cracks and pockets completely filled with fine sediments of the *Colombacci* Fm.

Based on their rich content in Late Messinian terrestrial vertebrates, this emersion took place at the end of the Messinian (ca. 5.5 Ma) and lasted for less than 100 ky.

This discovery clearly evidences the intra-Messinian tectonic uplift phase, during which the gypsum deposits were tilted.

This short emersion, accompanied by karstic phenomena, has also been documented in other N-Italian areas (e.g. Moncucco Quarry, Piedmont) (FIORASO *et alii*, 2004; FIORASO & BOANO, 2002) and elsewhere (e.g. Sorbas, SE Spain, MARTIN & BRAGA, 1996), and present-day caves forming by rising fluids (hypogenic caves) appear to be propitiated upon these intra-Messinian karst voids (VIGNA *et alii*, 2010).

This intra-Messinian erosion surface is often believed to have developed in response

Fig. 6 - Palaeokarstic morphologies of the *Grotta di Monte Rocca*, visible where the filling has been removed by the quarry works. A. Ceiling channel (G in Fig. 5) with flat roof dipping 42° towards the NNW and roughly parallel to the gypsum bedding measured nearby; B. Pendants, whose axes form angles of about 25° with the vertical line (F in Fig. 5), the plane perpendicular to the pendants axes is inclined nearly 25° toward NW. Person for scale. / *Speleoforme paleocarsiche della Grotta di Monte Rocca, visibili solo dove il riempimento è stato rimosso dai lavori di cava. A. Canale di volta con soffitto piatto avente un'inclinazione di 42° verso NNO (G in Fig. 5), molto prossima a quella degli strati gessosi contigui (inclinati di circa 40° nella stessa direzione). B. Pendenti, i cui assi di allungamento formano angoli di circa 25° con la verticale (F in Fig. 5); il piano perpendicolare agli assi dei pendenti è inclinato di circa 25° verso NO. Le dimensioni delle speleoforme sono ricavabili da quelle dei due speleologi.*

subirono una rotazione di circa 25°, che è 15° - 18° minore di quella che coinvolse gli strati gessosi, il riempimento della Galleria dei Quattro ed il post-antigravitativo ceiling channel. Questi pendenti sono perciò più recenti della Galleria dei Quattro, del suo riempimento e del ceiling channel, e si formarono quando la Grotta di Monte Rocca era già stata inclinata dai movimenti tettonici di 15°-18°. Ciò significa anche che nella Grotta di Monte Rocca si verificarono almeno due fasi di erosione antigravitativa, separate da un lungo intervallo di tempo.

Discussione e conclusioni

Nel 1985 escavazioni nella Cava Monticino (Brisighella, Ravenna) rivelarono per

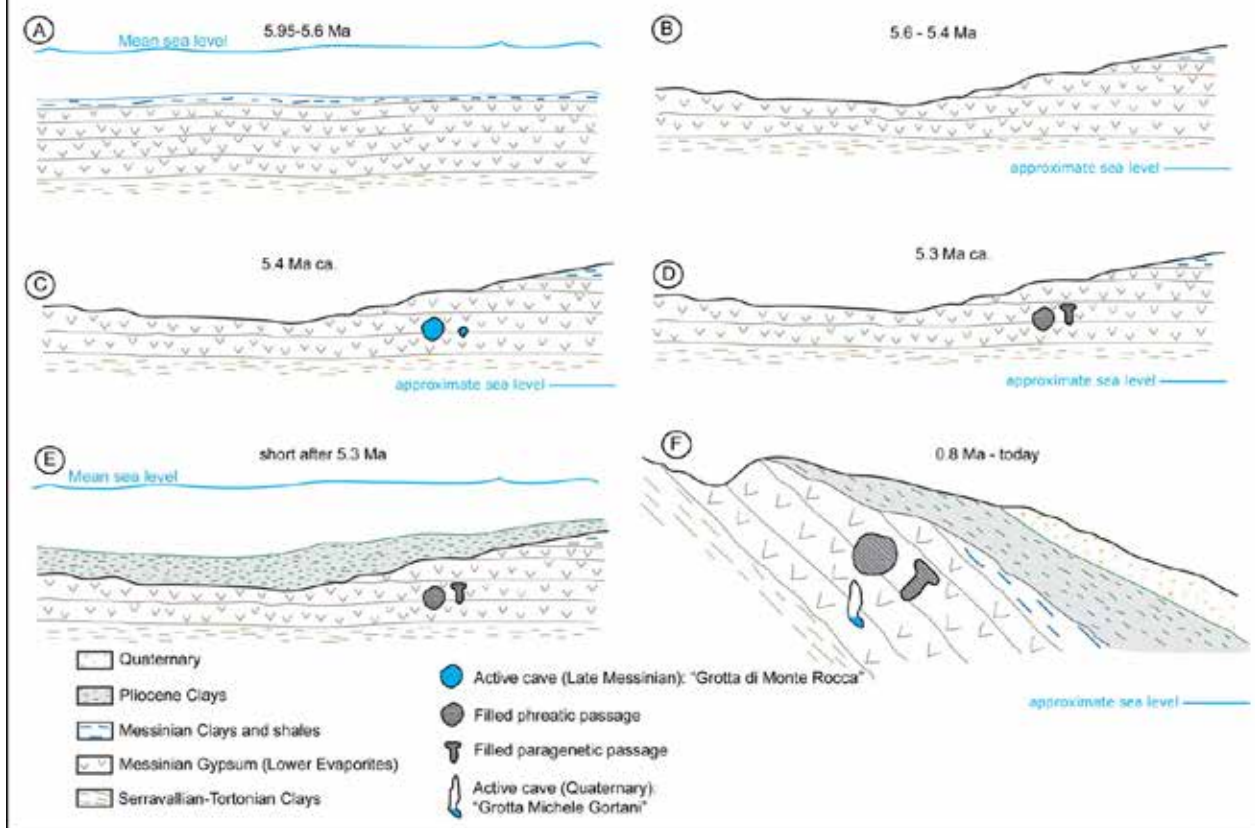


Fig. 7 - Scheme showing the formation of the “Grotta di Monte Rocca” and “Grotta Michele Gortani” cave systems.

A. Deposition of the Lower Evaporites; B. Emersion of the gypsum rocks and surface erosion, caused by sea level lowering and very probably also by uplift due to the intra-Messinian tectonic phase; C. Formation of the older cave system (“Grotta di Monte Rocca”), with phreatic conduits (till 4 x 5 metres wide) and vadose passages; D. Total infilling of the older cave system, and formation of antigravitative and post-antigravitative morphologies and end of the first karst cycle; E. New submersion of the area; F. Last emersion - caused by the Middle to Late Pliocene-Quaternary tectonic phase -, and recent formation of the “Grotta Michele Gortani” and present-day situation. / Schema illustrante la formazione dei sistemi sotterranei “Grotta di Monte Rocca” e “Grotta Michele Gortani”.

A. Deposizione delle Lower Evaporites; B. Emersione degli strati gessosi ed erosione superficiale, causata da un abbassamento del livello marino e molto probabilmente anche da un sollevamento dovuto alla fase tettonica intra-messiniana; C. Formazione del sistema ipogeo più antico (Grotta di Monte Rocca), con tubi freatici (fino a 4 x 5 metri in sezione trasversale) e gallerie vadose; D. Riempimento totale della Grotta di Monte Rocca e formazione di morfologie antigravitative e post-antigravitative; fine del 1° ciclo carsico; E. Nuova sommersione dell'area; F. Ultima emersione dell'area - causata dalla fase tettonica che durò dal Pliocene Medio al Tardo Pliocene-Quaternario -, formazione recente della Grotta Michele Gortani e situazione attuale.

la prima volta una fase carsica intra-messiniana, sviluppata durante un'emersione dei gessi. Tale fase è evidenziata da piccole fessure e cavità carsificate e completamente riempite da sedimenti fini della Formazione a Colombacci. In base al loro ricco contenuto in vertebrati terrestri del Tardo Messiniano fu possibile stabilire che l'emersione suddetta si verificò verso la fine del Messiniano (5,5 My ca.) e durò per meno di 100 ky. Questa scoperta evidenziò chiaramente la fase tettonica di sollevamento intra-messiniana, durante la quale gli strati gessosi furono inclinati.

Questa breve emersione, accompagnata da fenomeni carsici, è stata documentata anche in altre aree dell'Italia settentrionale (ad es. Cava Moncucco, Piemonte) (FIORASO et alii, 2004; FIORASO & BOANO, 2002) ed altrove (ad es. Sorbas, Spagna sud-orientale, MARTIN & BRAGA, 1996). Alcune grotte attuali nel Monferrate (Piemonte) che si formano per risalita di fluidi (grotte ipogeniche) risultano favorite nel loro sviluppo da interstizi carsici intra-messiniani (VIGNA et alii., 2010). Molti autori ritengono che questa superficie di erosione intra-messiniana si sia sviluppata in risposta ad una fase tettonica intra-messiniana (FIORASO et alii, 2004; LUGLI et alii, 2010), accompagnata da un forte abbassamento del livello marino (KRIJGSMAN et alii, 1999). Questo evento

to an intra-Messinian tectonic phase (FIORASO *et alii*, 2004; LUGLI *et alii*, 2010), accompanied also by a dramatic sea level drop (KRIJGSMAN *et alii*, 1999).

This intra-Messinian tectonic event, well-documented for example in the *Vena del Gesso* basin, is connected to the evolution of the Apenninic orogenic wedge and the migration of the compressive front and associated foredeep basin toward the North (*i.e.* the Po Plain) (ROVERI *et alii*, 2003).

A well-developed gypsum palaeokarstic cave, the *Grotta di Monte Rocca*, discovered only a few years ago in a quarry close to Zola Predosa (Bologna), can also be related to this intra-Messinian continental period. This cave is completely filled with sediments and also hosts some post-antigravitative morphologies.

Both the gypsum layers, the cave and its bedded fillings were originally sub-horizontal; then they were tilted to their present inclination of about 40°-45° towards NNW. The probable speleogenetic evolution of the cave systems near Zola Predosa is shown in Figure 7. Compared to the size of the present-day gypsum cave systems, this cave might have formed in some ten thousands of years.

This big palaeokarstic cave demonstrates that the intra-Messinian speleogenesis, known from other locations around the Mediterranean, was very active in the Zola Predosa area.

tettonico intra-messiniano, ben documentato ad esempio nel bacino della Vena del Gesso, è connesso con l'evoluzione del cuneo orogenico appenninico e con la migrazione del fronte compressivo e dell'associato bacino di avanfossa verso Nord (cioè verso la Pianura Padana) (ROVERI et alii, 2003).

Anche la formazione della Grotta di Monte Rocca - una grotta gessosa paleocarsica ben sviluppata, scoperta solo nel 2010 in una cava vicino a Zola Predosa (BO) - deve essere attribuita a questo periodo continentale intra-messiniano. Questa grotta è completamente riempita da sedimenti continentali e presenta alcune speleoforme antigravitative e post-antigravitative. I banchi gessosi, la grotta e gli strati del suo riempimento erano originariamente sub-orizzontali; poi essi furono inclinati fino alla loro attuale pendenza di circa 40°-45° verso NNO. La probabile evoluzione speleogenetica dei sistemi di grotte presso Zola Predosa è illustrata nella Fig. 7. Se paragoniamo le dimensioni della Grotta di Monte Rocca con quelle dei sistemi di grotte gessose attualmente in via di formazione, possiamo affermare che la Grotta di Monte Rocca dovrebbe essersi formata in alcune decine di migliaia di anni. Questa grande grotta paleocarsica dimostra che la speleogenesi intra-messiniana, nota in altre località attorno al Mediterraneo, fu particolarmente attiva nella zona di Zola Predosa.

REFERENCES / CITAZIONI BIBLIOGRAFICHE

- BERTOLANI M. & ROSSI A., (1972), *Osservazioni sui processi di formazione e di sviluppo della Grotta del Farneto* (Bologna), Atti del VII Convegno Speleologico dell'Emilia Romagna e del Simposio di Studi sulla Grotta del Farneto, San Lazzaro in Savena-Bologna, pp. 127-136.
- CLAUZON G., SUC J. P., GAUTIER F., BERGER A. & LOUTRE M. F., (1996), *Alternate interpretation of the Messinian salinity crisis: Controversy resolved?*, *Geology* 24(4), pp. 363-366.
- COSTA G., COLALONGO M. L., DE GIULI C., MARABINI S., MASINI F., TORRE D. & VAI G. B., (1986), *Latest Messinian vertebrate fauna preserved in a Paleokarst-nep-tunian dike setting*, *Le Grotte d'Italia* 12, pp. 221-235.
- DALMONTE C., DE WAELE J., FORNACIARI E., PASINI G., VAIANI S. C., CORREALE C. & FABBRI F., (2012), *Fenomeni carsici tardo-Messiniani*, In: DEMARIA D., FORTI P., GRIMANDI P. & AGOLINI G. (eds.), *Le Grotte Bolognesi*, GSB/USB, Bologna, pp. 218-219.
- DE WAELE J. & PASINI G., (2013), *Intra-messinian gypsum palaeokarst in the Northern Apennines and its palaeogeographic implications*, *Terra Nova*, 25 (3), pp. 199-205. Doi: 10.1111/ter.12021,
- FARRANT A. R. & SMART P. L., (2011), *Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and paragenesis*, *Geomorphology* 134(1-2), pp. 79-93.
- FIORASO G., BICCHI E., IRACE A. & BOANO P., (2004), *Manifestazioni carsiche nelle evaporiti messiniane del Monferrato e della Collina di Torino (Italia Nord-Occidentale): analisi dei meccanismi genetici nel quadro dell'evoluzione pliocenico-quadernaria del bacino Terziario Piemontese*, *Il Quaternario* 17(2), pp. 453-476.

- FIORASO G. & BOANO P., (2002), *Cavit  di dissoluzione e fenomeni di sprofondamento nei gessi del Monferrato settentrionale: meccanismi genetici ed effetti sulla stabilit  dei versanti*, GEAM 107, pp. 19-26.
- KRIJGSMA W., HILGEN F. J., RAFFI I., SIERRO F. J. & WILSON D. S., (1999), *Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis*, Nature 400, pp. 652-655.
- LOURENS L. J., HILGEN F. J., LASKAR J., SHACKLETON N. J. & WILSON D., (2004), *Appendix 2. Orbital tuning calibrations and conversions for the Neogene period*, In: GRADSTEIN F., OGG J. & SMITH A. (eds.), *A Geologic Time Scale 2004*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 469-484.
- LUCCI P. & ROSSI A., (2011), *Speleologia e geositi carsici in Emilia-Romagna [Speleology and Karst Geosites in Emilia-Romagna]*, Pendragon, Bologna, 447 p.
- LUGLI S., MANZI V., ROVERI M. & SCHREIBER B. C., (2010), *The Primary Lower Gypsum in the Mediterranean: A new facies interpretation for the first stage of the Messinian salinity crisis*, Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 297, pp. 83-99.
- MARABINI S. & VAI G. B., (1985), *Analisi di facies e macrotettonica della Vena del Gesso in Romagna*, Bollettino Societ  Geologica Italiana 104, pp. 21-42.
- MARABINI S. & VAI G. B., (1989), *Geology of the Monticino Quarry, Brisighella, Italy. Stratigraphic implications of its late Messinian mammal fauna*, Bollettino della Societ  Paleontologica Italiana 28(2-3), pp. 369-382.
- MARINELLI O., (1917), *Materiali per lo studio dei fenomeni carsici III. Fenomeni carsici nelle regioni gessose d'Italia*, Memorie della Rivista Geografica Italiana 34, pp. 263-416.
- MARTELLI L., BENINI A., DE NARDO M. T. & SEVERI P., (2008), *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia, Foglio 220, Casalecchio di Reno, Scale 1:50,000*, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Regione Emilia Romagna, Bologna, 124 p.
- MARTIN J. M. & BRAGA J. C., (1996), *Tectonic signals in the Messinian stratigraphy of the Sorbas basin (Almer a, SE Spain)*, In: FRIEND P. F. & DABRIO C. J. (eds.), *Tertiary basins of Spain: the stratigraphic record of crustal kinematics*, World and Regional Geology Series, Cambridge University Press, New York, pp. 387-391.
- PASINI G., (1969), *Fauna a mammiferi del Pleistocene Superiore in un paleoinghiottitoio carsico presso Monte Croara (Bologna)*, Le Grotte d'Italia II (4), pp. 1-46.
- PASINI G., (1970), *Contributo alla conoscenza del tardo Wurmiano e del post-Wurmiano nei dintorni di Bologna (Italia)*, Giornale di Geologia 36, pp. 687-700.
- PASINI G., (2009), *A terminological matter: paragenesis, antigravitational erosion or antigravitational erosion?*, International Journal of Speleology 38(2), pp. 129-138.
- PASINI G., (2012), *Speleogenesis of the "Buco dei Vinchi" inactive 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(1), pp. 15-34.
- ROVERI M. & MANZI V., (2006), *The Messinian salinity crisis: Looking for a new paradigm?*, Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 238(1-4), pp. 386-398.
- ROVERI M., MANZI V., LUCCHI F. R. & ROGLEDI S., (2003), *Sedimentary and tectonic evolution of the Vena del Gesso basin (Northern Apennines, Italy): Implications for the onset of the Messinian salinity crisis*, Geological Society of America Bulletin 115(4), pp. 387-405.
- VIGNA B., FIORASO G., BANZATO C. & DE WAELE J., (2010), *Evolution of karst in Messinian gypsum (Monferrato, Northern Italy)*, Geodinamica Acta 23(1-3), pp. 29-40.