

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Scienze Geologiche

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali

Relazione di Laurea

Rilevamento geomorfologico delle principali forme legate al processo sulfureo acido (SAS) nei rami turistici della Grotta Grande del Vento, Frasassi (Marche, Italia)

Relatore:

Prof. Jo De Waele

Candidato:

Correlatore:

Riccardo Nicolini

Dott. Ilenia D'Angeli

Sessione Ottobre 2018

Anno Accademico 2017-2018

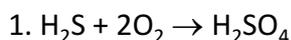
INDICE

1. Introduzione	4
2. Inquadramento geologico e geografico.....	6
3. Descrizione della Grotta Grande del Vento	8
4. Metodi	11
5. Risultati.....	12
6. Discussione	15
7. Conclusioni	18
8. Bibliografia.....	21
Ringraziamenti	24

1.INTRODUZIONE

La storia di una grotta è normalmente ricostruita immaginando che l'acqua proveniente dalle precipitazioni (acqua meteorica), sia assorbita per infiltrazione all'interno dell'ammasso roccioso con condizioni litologiche e strutturali (come porosità e permeabilità) adatte (Passeri, 1972; Cattuto & Passeri, 1974). Generalmente le rocce carbonatiche ed evaporitiche sono caratterizzate da una certa porosità secondaria legata alla presenza di faglie, diaclasi o sistemi di fratture minori, a formare un vero e proprio reticolo all'interno dei quali l'acqua meteorica viene convogliata sotto forma di flussi sotterranei (Bocchini & Coltorti, 1978; Menichetti 1990). Le rocce carbonatiche sono solubili in acqua in particolari condizioni legate alla presenza di sostanze acide, come ad esempio la CO₂. Le acque piovane contengono generalmente piccoli quantitativi di anidride carbonica disciolta, assorbita direttamente dall'atmosfera. Solo attraversando il suolo, l'acqua piovana si arricchisce di CO₂, diventando aggressiva e quando raggiunge le sottostanti rocce carbonatiche tende a dissolverle. Così, le fratture e/o faglie tenderanno ad ingrandirsi, fino a formare veri e propri canali capaci di far fluire l'acqua velocemente verso valle. Le grotte che si formano in questa maniera vengono definite epigeniche (Palmer, 2011)

Le grotte di Frasassi, diversamente, sono sistemi ipogenici (Galdenzi & Menichetti, 1995; Palmer, 2011) legati alla speleogenesi solfurea acida (in inglese sulfuric acid speleogenesis, il cui acronimo è SAS), ossia dovuti alla presenza di H₂S (acido solfidrico) (Egemeir, 1981; Galdenzi, 1990; Palmer, 2013). Solo durante le ultime due decadi si è notevolmente sviluppato l'interesse scientifico per gli studi delle cavità carsiche ipogeniche, delle quali Frasassi è uno tra i migliori esempi al mondo, assieme alle grotte delle Guadalupe Mountains (Jagnow et al., 2000). Il processo che porta alla formazione delle grotte ipogeniche è dovuto alla risalita di acque profonde (Klimchouk, 2007) arricchite di H₂S, CO₂ e CH₄ (Hill, 1990; Webster et al., 2017). Nel caso delle grotte solfuree acide la componente principale è rappresentata dall'H₂S che in contesti ossidativi si trasforma in H₂SO₄ (acido solforico) secondo la reazione 1.



L'H₂S può avere varie origini: i) attività vulcaniche (Aiuppa et al., 2005) e magmatiche (Cavarretta & Lombardi, 1992), ii) riduzione batterica e/o termale (Machel, 2001) dei solfati presenti in profondità come nei livelli evaporitici (Evaporiti Triassiche), o materia organica e idrocarburi contenuti nelle rocce sedimentarie iii) riduzione dei solfati contenuti nelle acque marine coinvolte nella circolazione profonda (Santaloia et al., 2016), iv) riduzione dei solfuri, quali ad esempio pirite, marcasite, etc... (Morehouse, 1968; Tisato et al., 2012) L'ossidazione dell'H₂S può avvenire in due ambienti:

nell'atmosfera di grotta (Galdenzi, 1990) o quando l'acqua profonda raggiunge la falda superficiale ricca di O₂ (Engel et al., 2004). L'H₂SO₄, essendo un acido molto forte, reagisce immediatamente con la roccia in posto, spesso costituita da carbonati, dissolvendo il calcare, producendo gesso di sostituzione (CaSO₄·2H₂O) e liberando CO₂ nell'ambiente circostante (reazione 2). Ciò contribuisce all'aumento generale di acidità e, conseguentemente, alla dissoluzione del calcare e delle altre rocce carbonatiche (reazione 3). Il gesso prodotto, essendo molto solubile, viene rimosso facilmente dalle acque in movimento, producendo un conseguente aumento del volume dei vuoti. Le grotte ipogeniche sulfuree possono svilupparsi in condizioni freatiche confinate e al livello della tavola d'acqua in condizioni non-confinate (Klimchouk, 2017). Le prime sono caratterizzate da gallerie labirintiche anastomizzate, a spugna o a rete (Klimchouk, 2007; Palmer, 2013), condotti circolari (Fig.1 A), duomi (le acque che risalgono sono caratterizzate da moti convettivi legati a gradienti di temperatura) (Fig.1 B), canali di alimentazione (Fig.1 C) o "*feeders*" (ossia passaggi verticali o sub-verticali attraverso i quali l'acqua profonda raggiunge la grotta), camini ciechi (Fig.1 D), canali che tendono a risalire verso l'alto, gallerie che tendono a chiudersi in maniera brusca, e tracce di degassamento lungo le pareti. Per le grotte che si sviluppano in condizioni non confinate il processo dominante è quello di condensazione-corrosione. Tale processo è particolarmente attivo nella zona vadosa prossima alla tavola d'acqua, dove maggiore è il contenuto di ossigeno (Galdenzi, 1990), e quindi può avvenire l'ossidazione dell'H₂S in H₂SO₄. Per questo motivo le grotte sulfuree tendono a svilupparsi su livelli che rispecchiano gli antichi stazionamenti della falda sulfurea (Piccini et al., 2015; De Waele et al., 2016). Il successivo abbassamento del livello di base causa l'abbandono delle gallerie e lo spostamento delle azioni corrosive-dissolutive verso il basso (Fig.1 E). Il vapore acido arriva a contatto con pareti e volte delle gallerie corrodendo e dissolvendo la roccia calcarea e producendo depositi di gesso e zolfo (Fig.1 F). Le forme tipiche sono: tasche di corrosione e sostituzione o "*replacement pockets*" (Fig.1 G), cupole (Fig.1 H), "*megascallops*" (Fig.1 I) (i vapori caldi e acidi che si muovono verso l'alto dissolvono la roccia carbonatica producendo delle morfologie circolari lungo pareti e volte) (Plan et al., 2012), "*boxwork*" (la presenza di vene secondarie cristalline favorisce la dissoluzione differenziale della roccia), solchi lungo le pareti (evidenze di stazionamenti di acqua), karren sulfurei (De Waele et al., 2016) e tubi verticali legati allo stillicidio di acque acidule. L'obiettivo di questo elaborato è stato quello di rilevare le morfologie ipogeniche osservabili all'interno del ramo turistico del complesso delle Grotte di Frasassi (Genga), ed in particolare della Grotta Grande del Vento. Spesso tali forme risultano coperte da depositi chimici secondari di origine epigenetica come stalattiti, stalagmiti, colonne e colate. Le osservazioni geomorfologiche condotte per questo lavoro hanno poi permesso di aggiornare la mappa morfologica precedentemente prodotta da Bocchini e Coltorti (1990).

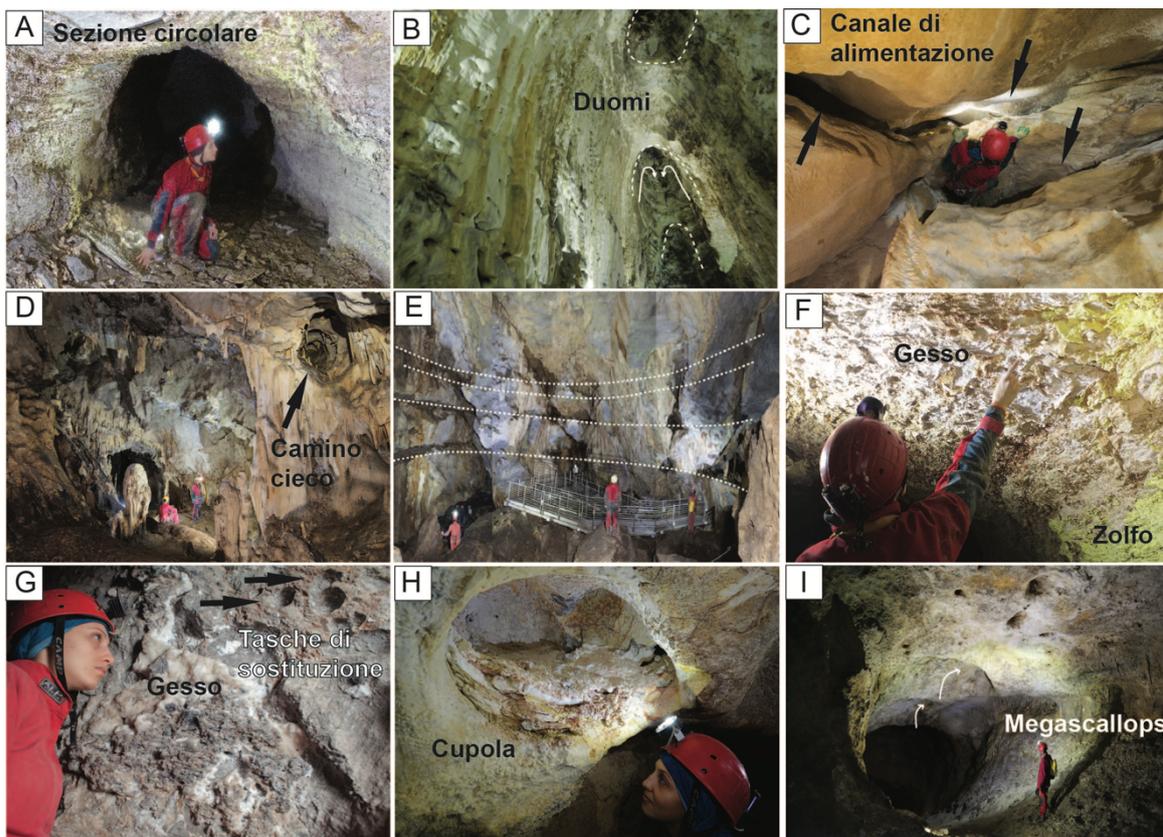


Fig.1- Morfologie e depositi tipici delle grotte ipogeniche sulfuree. A) Condotti circolari ben visibili nelle gallerie basse della Grotta Nuova ad Acquasanta Terme, Marche (Foto di Simonetti R.); B) Strutture a duomo nei rami turistici de La Grotta in Monte Cucco, Umbria (Foto di Nagostinis M.); C) Canale di alimentazione nella Grotta Damale, Cerchiara di Calabria (Foto di Vattano M.); D) Camino cieco nella Grotta Serra del gufo, Cerchiara di Calabria (Foto di Vattano M.); E) Livelli suborizzontali tipici di stazionamento della falda sulfurea, Cassano allo Ionio, Calabria (Foto di Lacarbonara O.); F) Depositi di gesso e zolfo accresciutisi sulle pareti in seguito ai processi di corrosione-condensazione in Acquasanta Terme (Foto di Simonetti R.); G) Tasche di sostituzione e depositi di gesso nella grotta di Sant'Angelo, Cassano allo Ionio, Calabria (Foto di Lacarbonara O.); H) Cupola nella Grotta che parla, Palermo (Foto di Vattano M.), I) Megascallops nella Grotta del Cavallone, Abruzzo (Antonini G.).

2. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

Le Grotte di Frasassi (Fig.2 A) si trovano nel territorio del comune di Genga, in provincia di Ancona, nelle Marche. Il complesso ricade all'interno del Parco naturale regionale della Gola della Rossa e di Frasassi. Si aprono nel versante adriatico dell'Appennino Umbro-Marchigiano, a circa 40 km dal mare, in una piccola dorsale anticlinale tagliata da una profonda incisione fluviale, la Gola di Frasassi (Fig.2 B), in cui scorre il Torrente Sentino (Galdenzi, 2004a; 2004b). I complessi carsici che caratterizzano la zona si sviluppano all'interno di Monte Valmontagnana e Monte Frasassi, rispettivamente alti circa 900 m e

700 m.

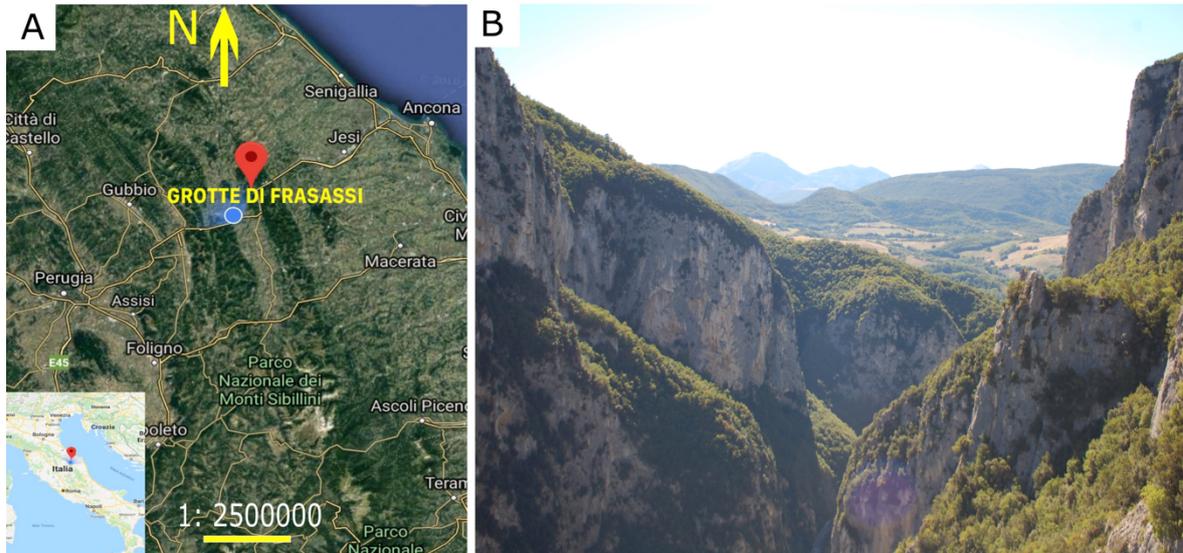


Fig.2- A) Ubicazione geografica delle Grotte di Frasassi, Marche; B) Gola di Frasassi che separa il Monte Valmontagnana e Monte Frasassi (Foto di Martini A.)

Le grotte si aprono nella parte più esterna dell'Appennino Umbro-Marchigiano, in una fascia altimetrica compresa tra i 200 m e i 500 m, al nucleo di una struttura anticlinale di forma asimmetrica disposta circa parallelamente alla costa adriatica con orientazione NNO-SSE ed una tipica vergenza appenninica verso NE. I maggiori fenomeni carsici si sviluppano sul versante meridionale della gola di Frasassi, nel Monte Valmontagnana (Galdenzi & Menichetti, 1995). La principale sorgente, sulfurea, è ubicata allo sbocco della gola ad una quota di circa 205 m s.l.d.m, dove la valle fluviale incide le coperture marnose che avvolgono il nucleo calcareo (Galdenzi, 2004b). Come anche in tutto il resto dell'Appennino, la situazione tettonica è molto complessa e la zona di Frasassi (Fig.3) ne è un perfetto esempio visti i numerosi affioramenti che si possono osservare. Si riscontrano sistemi compressivi di pieghe antiformali, sovrascorse verso E/NE tagliate da successivi eventi estensionali che hanno prodotto faglie normali. La zona di Frasassi è interessata dalla sequenza umbro-marchigiana (Galdenzi, 2004a; 2004b). Partendo dai resti più antichi e profondi si osservano:

- Evaporiti di Burano (Triassico Superiore-Giurassico Inferiore): localizzate alla base della successione umbro-marchigiana, sotto i calcari, non sono affioranti. La sequenza evaporitica è costituita da anidriti, gesso e dolomite. Questo livello è molto importante perché ha influenzato ed influenza tutt'ora il chimismo delle acque sotterranee con significativi effetti nella speleogenesi sulfurea acida;
- Calcare Massiccio (Giurassico Inferiore-Giurassico Medio): è la litologia principale della zona, costituita da calcari puri (98% CaCO_3), massivi o grossolanamente stratificati, con elevata permeabilità secondaria data da una fitta rete di fratture e faglie.

- Maiolica (Giurassico Superiore-Cretaceo Inferiore): calcari selciferi ben stratificati che derivano da deposizione in ambiente pelagico.
- Marne a Fucoidi (Cretaceo): marne e argille marnose varicolori con spessore di circa 50 m. Costituiscono un livello a bassa permeabilità abbastanza continuo in tutta la regione umbro-marchigiana. Non sono carsificabili, ma influenzano i drenaggi sotterranei e di conseguenza l'andamento e lo sviluppo delle cavità carsiche.
- Scaglia Bianca e Rossa (Cretaceo Superiore-Paleocene): calcari e calcari marnosi con livelli selciferi. La permeabilità è legata a fessurazione, ma risulta minore rispetto alla Maiolica a causa del maggior contenuto argilloso.

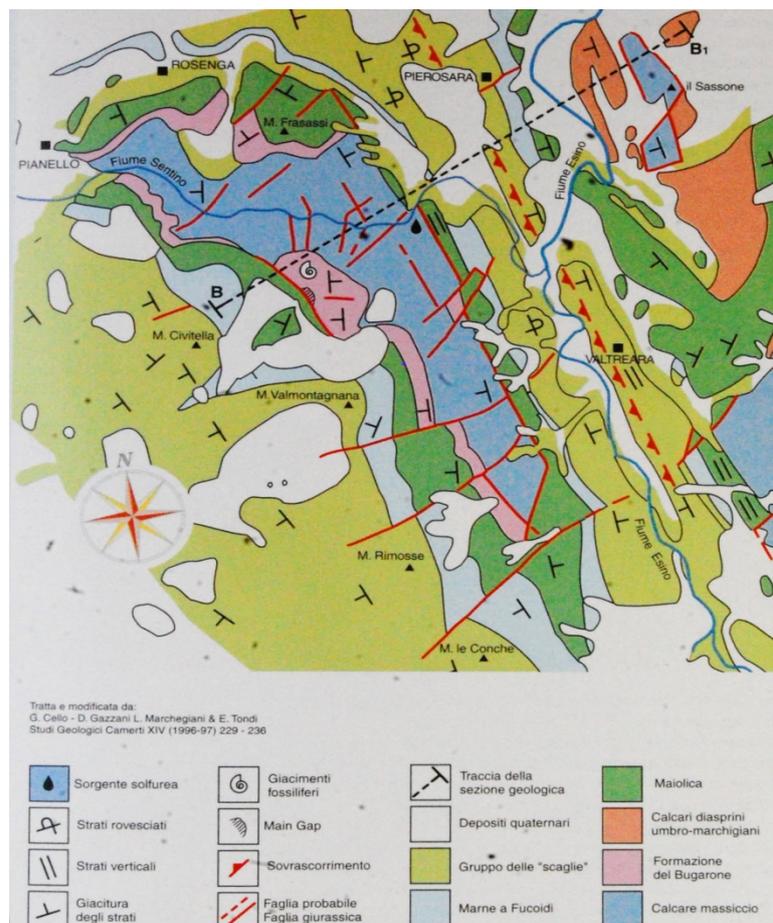


Fig.3- Carta geologica schematica della zona di Frasassi. Tratta e modificata da: Cello G., Gazzani D., Marchegiani L. & Tondi E. Studi Geologici Camerti XIV (1996-97), 229-236

3. DESCRIZIONE DELLA GROTTA GRANDE DEL VENTO

L'area di Frasassi presenta una fitta rete di sistemi di grotte (Fig.4) la cui lunghezza complessiva supera i 35 km. Sono conosciute e descritte oltre 100 grotte che rappresentano soltanto una parte dell'enorme sistema carsico (Galdenzi, 2004a; 2004b). Di queste grotte, solo tre presentano lunghezze superiori ad 1 km, mentre le altre si estendono da pochi metri fino a centinaia. I tre sistemi principali sono: 1) il complesso Grotta di Frasassi (Tempio del Valadier)-Grotta del Mezzogiorno, che si estende per circa

4 km e presenta un dislivello di 170 m, situato sulla sponda idrografica sinistra del Torrente Sentino, nel Monte Frasassi; 2) il Buco Cattivo, lungo circa 7 km e con un dislivello di 170 m, il quale si sviluppa sulla sponda idrografica destra del Torrente, con tre ingressi a circa 500 m s.l.m.; il complesso Grotta del Fiume-Grotta Grande del Vento, con un'estensione di 25 km e un dislivello di 200 m, nel Monte Valmontagnana (Galdenzi, 2004a). Tra questi il più importante e meglio conosciuto è proprio quest'ultimo sistema, scoperto in data 25 Settembre 1971 da un gruppo di speleologi del gruppo C.A.I di Ancona, (Galdenzi 2004a).

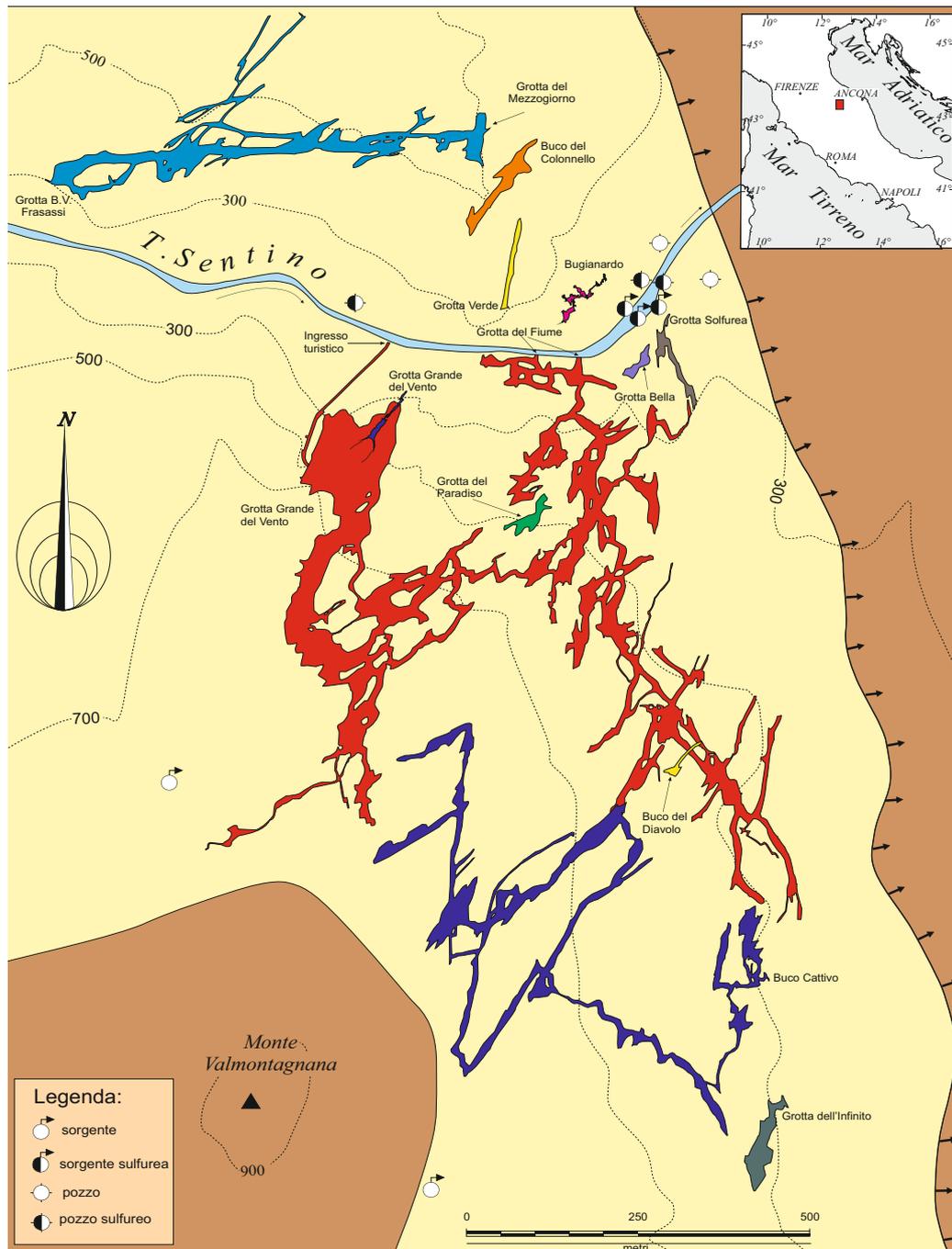


Fig.4- Planimetria dei principali sistemi carsici di Frasassi. In celeste è riportato il sistema "Grotta del Mezzogiorno-Grotta di Frasassi", in rosso "Grotta Grande del Vento-Grotta del Fiume", in blu "Buco Cattivo" (da Menichetti, 2002).

Il complesso Grotta del Fiume-Grotta Grande del Vento presenta una serie di gallerie sub-orizzontali (Galdenzi, 2004b) disposte su almeno sette livelli sovrapposti e collegate da pozzi e grandi sale (Bocchini & Coltorti, 1990). Il volume totale dei vuoti carsici è stato stimato essere oltre 2 milioni di metri cubi (Galdenzi e Menichetti, 1990; 1995). Il sistema carsico in alcune parti si addentra per oltre 1 km all'interno del massiccio calcareo, anche la porzione preponderante è prossima al versante esterno. La Grotta Grande del Vento è composta da 5 sale principali aperte al pubblico che si susseguono lungo un percorso di circa 1.4 km già attrezzato con camminamento. L'ingresso alla Grotta è artificiale e caratterizzato da una galleria situata ad una quota intermedia rispetto all'ingresso naturale, circa 300 m s.l.d.m (Bocchini & Coltorti, 1990), alla quale sono state inserite tre porte stagne ad apertura controllata che riducono gli scambi d'aria con l'esterno (Bertolani & Cigna, 1994). Da nord a sud, seguendo il percorso sul camminamento partendo dall'ingresso (Fig.5), le sale che si incontrano sono: "l'Abisso Ancona", un'enorme salone dal volume di circa 1 milione di metri cubi, lungo 180 m, largo 120 m e alto 200 m, che rappresenta il primo luogo scoperto durante l'esplorazione del 1971 (Galdenzi, 2004b). Osservando il tetto del salone è possibile notare uno spiraglio di luce artificiale posta dove è situato l'ingresso naturale dal quale si calarono gli speleologi al momento della scoperta. Nel pavimento del salone si può osservare un caotico ammasso di blocchi, risultato di importanti instabilità che hanno portato alla produzione di crolli. Al centro della sala, sono presenti i cosiddetti "Giganti", le stalagmiti più importanti della grotta, che presentano diametri di 2-5 m ed altezze da 5 a 25 m. Segue la "Sala Duecento", il cui nome è legato alla sua lunghezza. Al centro di questa stanza è possibile osservare una stalattite lunga 7.40 m, la più grande di tutto il complesso, denominata "Spada di Damocle". Da questo punto in poi le dimensioni delle sale si riducono, e proseguendo verso sud si giunge alla "Sala delle Candeline", dopo aver attraversato un vero e proprio canyon. Le ultime due sale che si incontrano sono la "Sala dell'Orsa", nella quale si possono osservare particolari morfologie e strutture legate alla risalita delle acque sulfuree, e la "Sala Infinito" punto finale del percorso turistico.

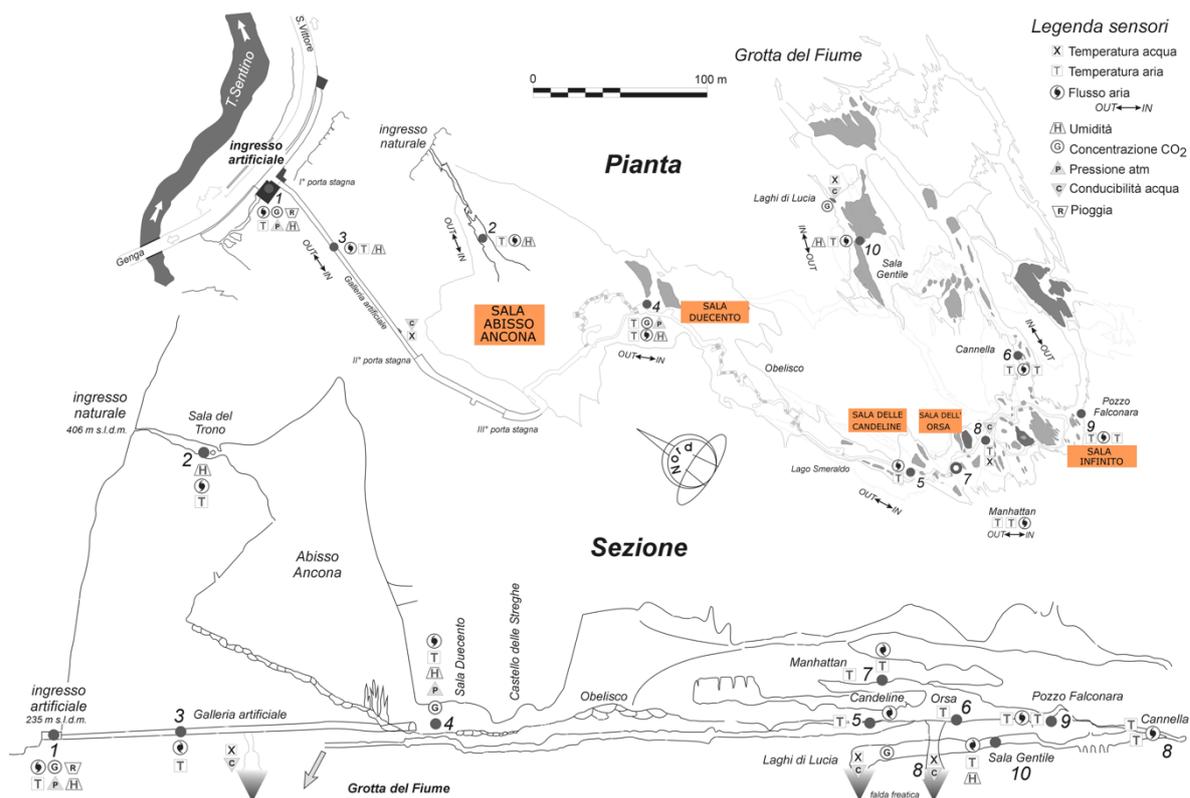


Fig.5- Sono riportate le sale principali della porzione turistica della Grotta Grande del Vento. Camminando da N a S si trovano l'Abisso Ancona, la Sala Duecento, la Sala delle Candeline, La Sala dell'Orsa, e la Sala Infinito.

4. METODI

La realizzazione della carta geomorfologica della parte turistica della Grotta Grande del Vento, oggetto di questo elaborato, è stato reso possibile sia attraverso le osservazioni geomorfologiche in sito (effettuate sette volte in due mesi), che grazie al confronto delle forme trovate con quelle riportate nelle vecchie mappe morfologiche della Grotta Grande del Vento. Si è infatti da subito cercato di reperire attraverso ricerche sul web e presso gli archivi del Consorzio Frasassi di Genga e della Biblioteca dell'Istituto Italiano di Speleologia, una base cartografica da cui partire (Bocchini e Coltorti, 1990) oltre che del materiale didattico per approfondire l'analisi. Una sezione e pianta digitale della zona turistica della Grotta Grande del Vento è stata fornita da Sandro Galdenzi.

Durante il rilevamento nella grotta il lavoro di Bocchini e Coltorti (1990) è stato utilizzato come modello di partenza e confronto per redigere la nuova mappa, mentre sulla pianta fornita da Galdenzi sono state riportate le diverse morfologie osservate con diversi simboli e due colori principali: il blu rappresenta il processo ipogenico sulfureo, mentre l'arancione indica il processo epigenico. Le prime osservazioni hanno riguardato le forme legate al processo sulfureo, e le successive tutti i depositi secondari di origine epigenica. Terminato il rilevamento geomorfologico della grotta e quindi dopo l'elaborazione di una

bozza cartacea, è stato utilizzato Inkscape, un editor grafico vettoriale, con il quale è stato possibile caricare il file del rilievo e digitalizzare il tutto.

5.RISULTATI

La zona turistica della Grotta Grande del Vento è caratterizzata da cinque sale principali (Fig.5), le quali differiscono sia per dimensioni che per morfologie caratteristiche. Com'è stato detto in precedenza il complesso "Grotta del Fiume-Grotta Grande del Vento" deve la sua origine alla risalita di acque sulfuree che sia per contatto diretto con la roccia, che per degassamento di H_2SO_4 nell'atmosfera hanno contribuito a corrodere il Calcareo Massiccio (Galdenzi & Menichetti, 1995). La prima sala, l'Abisso Ancona, è caratterizzata da un enorme salone lungo 180 m, largo 120 metri e alto 200 metri. La parte alta del salone presenta un duomo di enormi dimensioni (Fig.6 A), mentre se si osserva la parte basale, ad emergere sono i grandissimi massi derivanti dai vari crolli che si sono susseguiti a causa di instabilità (Fig.6 B). La sala Abisso Ancona ospita inoltre i famosi "Giganti", maestose stalagmiti situate circa al centro della stanza, che raggiungono dimensioni fino a 25 metri di altezza (Fig.6 C-D). Tipici di questa parte della grotta sono anche piccoli depositi di gesso affioranti vicino l'ingresso della sala sulla parete nord-occidentale (Fig.6 E-F).

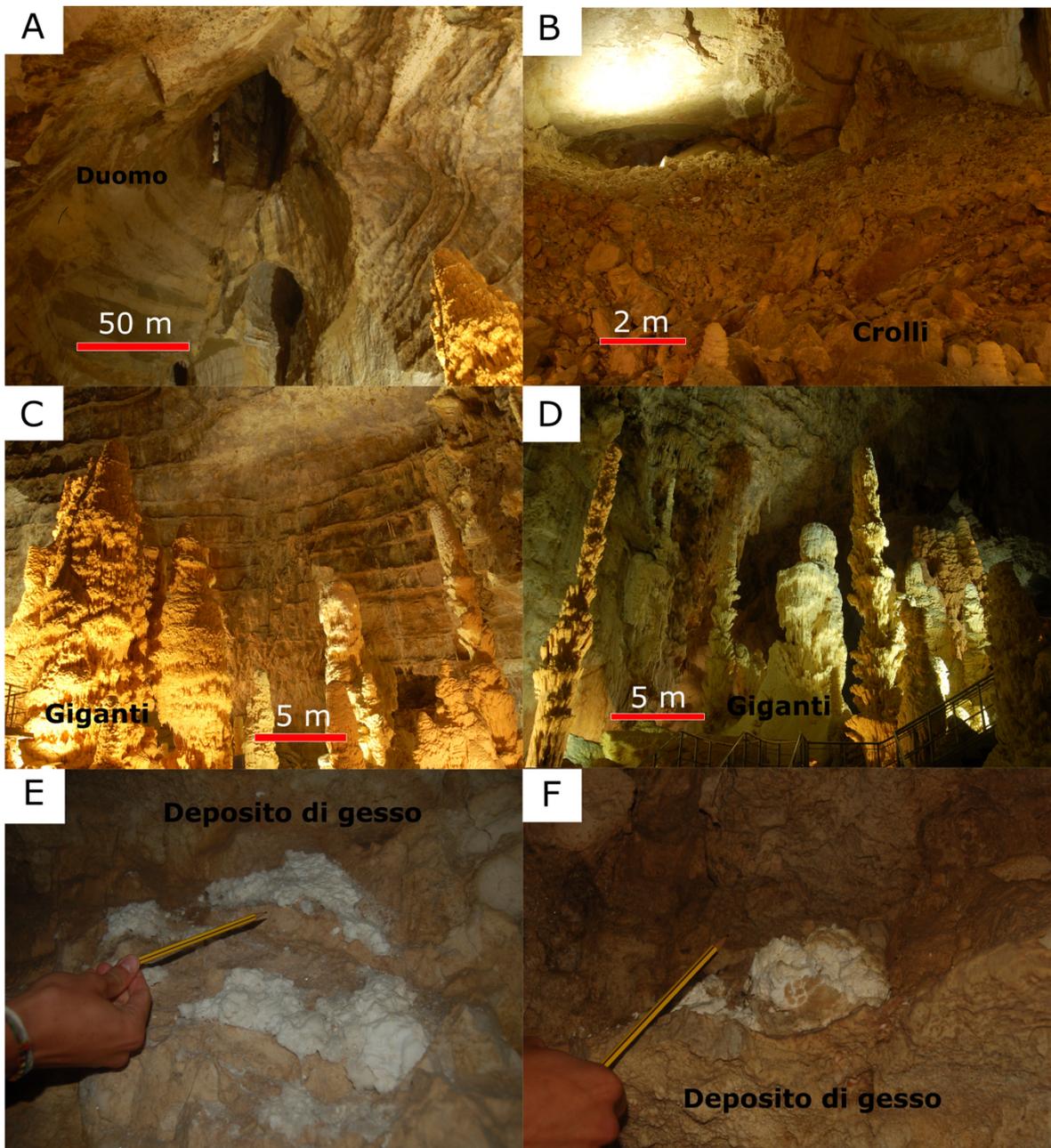


Fig.6- Sono riportate le principali morfologie e depositi chimici osservati nell'Abisso Ancona. A) Morfologia a Duomo sulla volta; B) Crolli sul pavimento; C-D) I "Giganti", le stalagmiti che crescono sui crolli; E-F) Gesso di sostituzione, localizzati nella zona più a nord dell'Abisso Ancona. Foto di Martini A.

Proseguendo verso sud, si raggiunge la Sala Duecento. A fare da raccordo con la precedente è un tratto di parete caratterizzata da *megascallops* e tasche da sostituzione. Ciò che però contraddistingue questa sala sono tre grandi duomi allineati N-S (Fig.7 A) che seguono l'andamento di una faglia normale (Fig.7 B) la quale è anche particolarmente evidente lungo la volta della sala. Circa al centro della stanza, dal tetto della cavità, è inoltre possibile osservare quella che viene chiamata "Spada di Damocle", una stalattite di 7.40 m, il simbolo di questa sala. Andando avanti lungo il camminamento, si incontrano le tre sale finali: Sala delle Candeline, Sala dell'Orsa e Sala Infinito. In questa parte della grotta, molto più interna alla montagna, a risaltare sono nuove morfologie legate al

processo sulfureo. Sono state infatti cartografate cupole di corrosione (Fig.7 C) e tasche di sostituzione (*replacement pockets*) (Fig.7 D-E) lungo la parete occidentale del canyon che collega la sala Duecento e quella delle Candeline. Inoltre sono stati mappati anche tipici esempi di zone con morfologie a spugna (dette anche “*spongeworks*”) (Fig.7 F), *megascallops* (Fig.7 G) e *partition walls* (Fig.7 H) nelle sale dell’Orsa e Infinito, in misura molto più abbondante che nel resto dell’intera grotta. Più precisamente, si hanno spettacolari esempi di tasche da sostituzione lungo il tratto che dalla Sala delle Candeline porta alla Sala dell’Orsa (Fig.7 D), mentre presso quest’ultima, proprio al suo inizio è possibile notare sulla parete orientale un esempio tipico di morfologie a spugna (Fig.7 F) . La sala Infinito invece presenta nitidi esempi di *megascallops* e *partition walls* nella parte sud-orientale (Fig.7 G), (Fig.7 H), e cupole di corrosione sulla volta della cavità (Fig.7 I) a fine percorso.

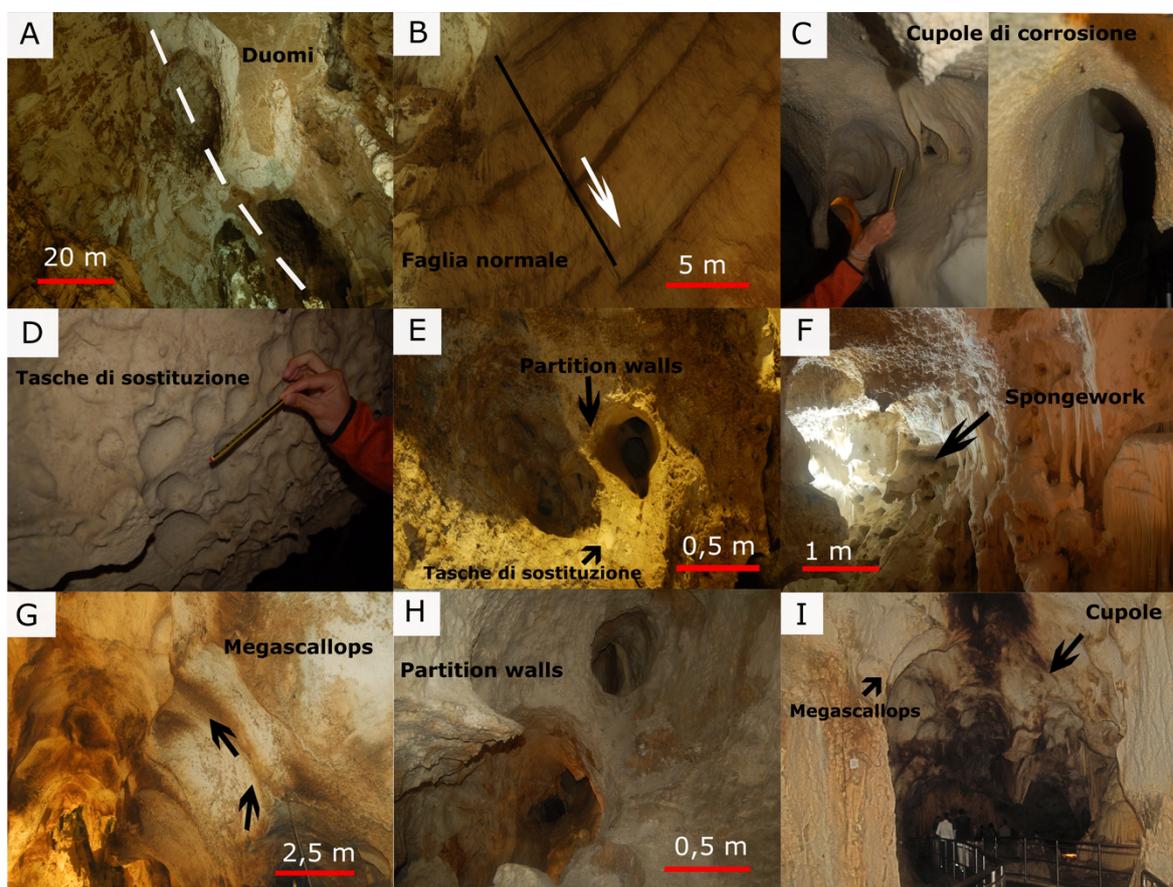


Fig.7- A) Duomi allineati sulla volta della Sala Duecento; B) Faglia normale che corre lungo la volta della Sala Duecento e lungo la quale si sviluppano i tre Duomi; C) Cupole di corrosione-condensazione; D-E) Tasche di sostituzione; F) Morfologie a spugna (*spongeworks*) sulla parete orientale delle Sala dell’Orsa; G) *Megascallops* sulla parete occidentale della sala dell’Infinito; H) *Partition walls* nella Sala dell’Infinito; I) Cupole di corrosione sul soffitto della Sala dell’Infinito. Foto di Martini A.

6. DISCUSSIONI

Facendo riferimento al sistema in esame, Grotta del Fiume-Grotta Grande del Vento, si sono osservate evidenti morfologie come duomi di grandi dimensioni, nell'Abisso Ancona e Sala Duecento, e la presenza di forme a spugna (nelle zone più interne) che testimonierebbero la genesi in condizioni freatiche (Galdenzi, 2001). I duomi si formano a causa di movimenti convettivi di acque acide. I grandi duomi nella Sala Duecento sono allineati e seguono una faglia con direzione N-S. Probabilmente i fluidi sulfurei acidi di risalita, fautori della loro genesi, fluivano all'interno di questa faglia/sistema di faglie attraverso punti denominati canali di alimentazione o "*feeders*" (che a causa dei crolli non sono attualmente visibili). Le osservazioni in situ hanno mostrato come la dimensione dei vuoti (gallerie) si riduca notevolmente passando dall'Abisso Ancona verso la Sala Infinito, in concomitanza con la drastica diminuzione della presenza degli speleotemi e concrezioni verso la parte più interna della porzione analizzata per questo studio.

Probabilmente, in seguito all'incisione della Gola di Frasassi, dovuta all'azione erosiva dei corsi d'acqua principali, che si faceva sempre più forte a causa del perdurare delle spinte orogeniche che sollevavano gli Appennini ed alla regressione della linea di costa, si sarebbe prodotto un abbassamento della falda sulfurea ed un conseguente aumento in grotta dei processi di condensazione dei vapori e gas acidi provenienti dall'evaporazione delle acque sulfuree e dal degassamento dell' H_2SO_4 sulla roccia carbonatica, producendo fenomeni di corrosione e formazione di morfologie peculiari come cupole, *megascollops*, *partition walls*, tasche e gesso di sostituzione (Galdenzi, 1990). Inoltre osservando in dettaglio l'intero sistema, è possibile notare come concrezioni tipicamente epigeniche (cannule, stalattiti, stalagmiti, colonne, e colate) siano abbondanti soprattutto nelle due sale prossime all'ingresso, mentre le zone più interne presentino spettacolari morfologie legate alla speleogenesi sulfurea-acida in perfette condizioni e non coperte da speleotemi. Nelle prime due sale, Abisso Ancona e Sala Duecento, infatti le morfologie tipiche del processo acido-solfureo sono per la maggior parte ricoperte da concrezioni formatesi successivamente (Galdenzi & Sarbu, 2000), quando questa zona della grotta, successivamente all'abbassamento della falda sulfurea data dall'approfondimento del Torrente Sentino, fu interessata da fenomeni di stillicidio, a causa della alta fratturazione e permeabilità della roccia in posto, probabilmente dovuto a fenomeni di rilascio tensionale in seguito all'incisione della gola fluviale. Diversamente, la zona più interna è caratterizzata da un massiccio roccioso meno fratturato. Nelle sale più interne, Sale delle Candeline-dell'Orsa-dell'Infinito, si osservano abbondanti cupole (Fig.7 C-I) e tasche di sostituzione (Fig.7 D-E), le quali si sviluppano lungo le pareti o sulle volte della cavità. Le prime si formano ad opera dei moti convettivi delle acque di risalita oppure per processi di condensazione-corrosione dovuti al differente gradiente termico (i soffitti delle gallerie sarebbero più freddi e consentirebbero ai vapori caldi contenenti H_2S di condensare e di

iniziare il processo di corrosione/dissoluzione della roccia) (Cigna & Forti, 1986). Le tasche di sostituzione invece possono contenere gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) che si forma in seguito alla corrosione-dissoluzione del carbonato di calcio (CaCO_3). L'elevata dissoluzione del gesso può portare alla totale denudazione delle forme emisferiche che lo contenevano (Galdenzi, 2004b), mostrando interessanti tasche (Fig.7 D). Sempre nella sala dell'Orsa sono state osservate altre morfologie tipiche da corrosione come *spongeworks* (Fig.7 F) e *partition walls* (Fig.7 H), che si formano per azione di acque acide stagnanti le quali nel tempo agiscono "cariando" la roccia in posto. Appena dopo la sala dell'Orsa, lungo il camminamento che da inizio alla sala Infinito, sulla parete occidentale si possono notare spettacolari esempi di *megascallops* (Fig.7 G), morfologie rotondeggianti dovute ai moti convettivi dei vapori sulfurei lungo le pareti e le volte dei condotti (Cigna & Forti, 1986; Plan et al., 2012). Il primo rilievo, di Bocchini & Coltorti (1990) è stato utilizzato come modello, ed ha evidenziato come dal 1990 ad oggi l'interpretazione delle forme sia cambiata notevolmente. Tutto ciò è dovuto al fatto che all'epoca non si era ancora sviluppato, (lo sarà soltanto a partire dagli ultimi venti anni), l'interesse scientifico per lo studio delle cavità carsiche ipogeniche, ed in generale, il processo ipogenico in sé non era ancora ben chiaro. Servendomi della carta morfologica del 1990 come materiale di confronto durante le osservazioni in loco, si è potuto notare come solo pochissime forme o morfologie legate alla speleogenesi SAS erano state cartografate, al contrario di quelle tipiche del processo epigenico: stalattiti, stalagmiti, colonne, concrezioni parietali, colate stalagmitiche, concrezioni a vaschette (*gours*), stalattiti tubolari, eccentriche e cristalli di calcite. Delle morfologie tipiche invece del processo ipogenico ritroviamo solamente cupole di corrosione con gesso, cristalli di gesso, marmitte inverse di corrosione e campi solcati ipogei. Mancano totalmente forme come duomi, tasche di sostituzione (*replacement pockets*), zone a *spongeworks*, *partition walls* e *megascallops*, le quali invece sono state riportate nella carta oggetto di questo elaborato in Figura 8. Analizzando la carta del 1990 (Fig.9) partendo da nord inoltre si osserva come non sia stato cartografato il deposito di gesso nella parete prossima all'ingresso artificiale e come siano assenti le importantissime morfologie dovute alla speleogenesi sulfurea-acida, a partire dal duomo che caratterizza la sala Abisso Ancona, ai duomi allineati lungo la faglia normale nella Sala Duecento, e alle cupole di corrosione, zone a *spongeworks*, *partition walls*, *replacement pockets* e *megascallops* che invece interessano le tre sale finali, delle Candeline, dell'Orsa e dell'Infinito, a conferma di quanto poco si sapeva in quegli anni riguardo questo tipo di speleogenesi.

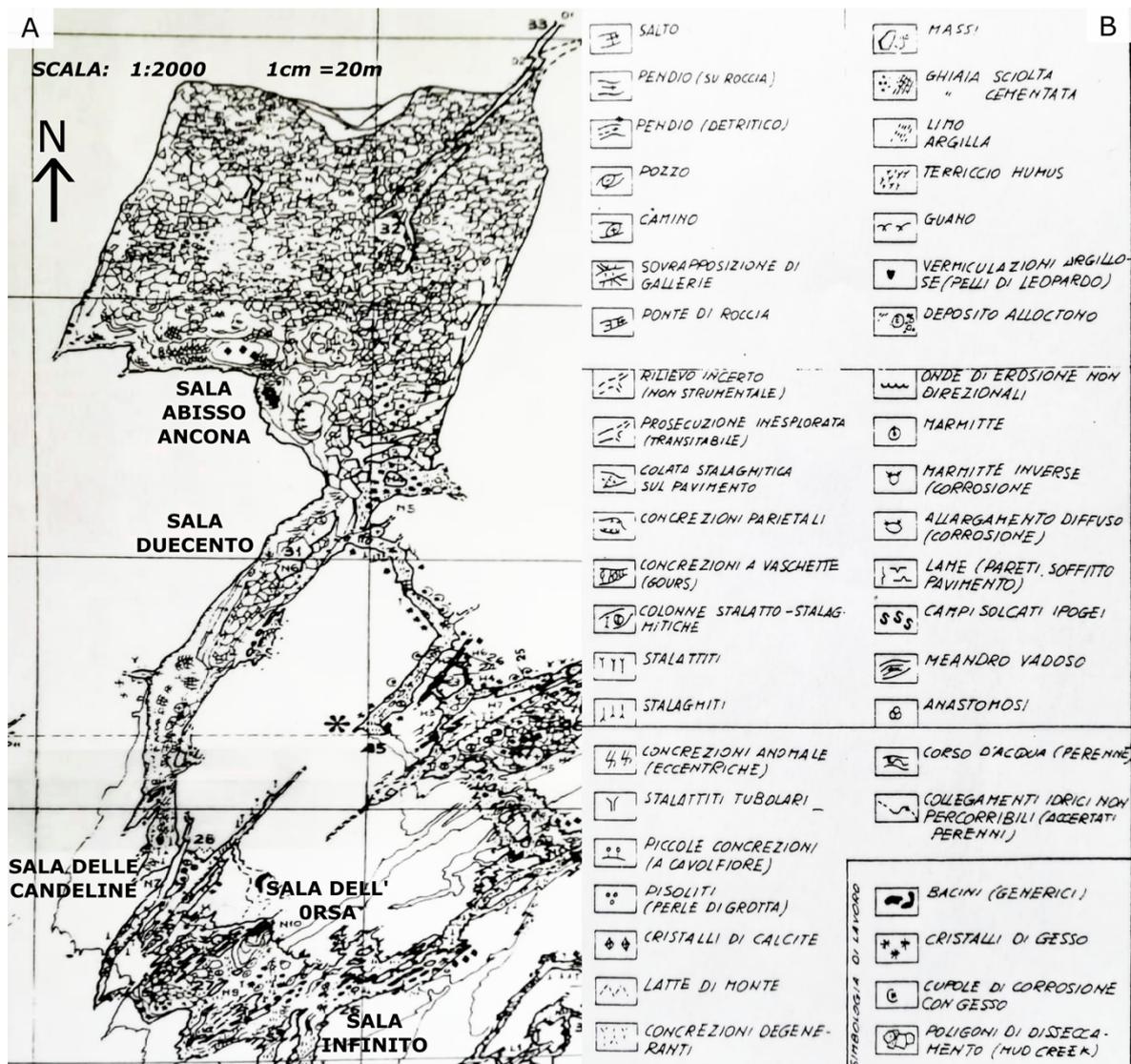


Fig.9- A)Pianta della zona turistica della Grotta Grande del Vento su cui sono riportate le morfologie e speleotemi osservati da Bocchini & Coltorti (1990); B)Legenda della carta.

7. CONCLUSIONI

L'analisi morfologica del sistema "Grotta del Fiume - Grotta Grande del Vento" e la successiva realizzazione della carta ha messo in luce una relativa abbondanza di tipiche morfologie di origine ipogenica sulfurea o "Sulfuric Acid Speleogenesis" (Galdenzi & Menichetti, 1995; Palmer, 2011; 2013). Sono stati riconosciuti duomi, ubicati nelle due sale più grandi e prossime all'ingresso antropico, che s'incontrano procedendo da N verso S, Abisso Ancona e Sala Duecento, formati in condizioni freatiche a causa del movimento convettivo di acque acide. I depositi di gesso, derivanti dall'interazione tra l' H_2SO_4 e roccia carbonatica, sono presenti ma non abbondanti, e spesso si osservano solo le impronte semisferiche lasciate sulla parete come le tasche di sostituzione. Le cupole di corrosione si osservano per lo più dalla fine della Sala Duecento alla Sala Infinito, lungo le volte della cavità e sulle pareti. Esse si sarebbero formate a causa dei moti convettivi delle acque di risalita o a seguito di processi di condensazione-corrosione dovuti al differente gradiente termico. Sono state rinvenute anche altre forme a conferma del tipo di processo che ha

dato origine a questo sistema, come zone con morfologie a spugna o “*spongeworks*” (Galdenzi, 2004b) e “*partition walls*”, che si sviluppano a causa dello stazionamento prolungato di acque sulfuree stagnanti e gas acidi su di una roccia calcarea, la quale viene in seguito letteralmente forata e cariata. Le morfologie a spugna sono ben visibili all’inizio della Sala dell’Orsa, mentre i “*partition walls*” caratterizzano la parte più a sud del percorso (Fig.8). In più, i moti convettivi dei vapori sulfurei lungo le pareti e le volte dei condotti hanno prodotto delle forme rotondeggianti chiamate *megascallops*, che si possono notare chiaramente nella Sala Infinito, sulla parete occidentale. Le dimensioni delle sale diminuiscono procedendo da nord verso sud. La parte del complesso che è stato oggetto di studio e rilevamento fa parte di un enorme sistema formato da gallerie sub-orizzontali poste su piani sovrapposti e collegate tra loro da profondi pozzi e grandi sale. L’intero sistema si sarebbe formato in condizioni freatiche caratterizzate da fluidi ipogenici sulfurei acidi. L’incisione della gola fluviale del Torrente Sentino (Passeri, 1972; Cattuto, 1976; Bocchini & Coltorti, 1978,1990), avrebbe prodotto l’abbassamento del livello base e della falda sulfurea, e quindi l’aumento dei processi legati alla condensazione-corrosione e degassamento di H_2SO_4 nell’atmosfera di grotta. Tutto questo è possibile osservarlo proprio in quella che oggi è la parte turistica della grotta, che rappresenta uno dei piani superiori e più antichi del sistema. Questi livelli superiori sono fossili, mentre le diramazioni inferiori prossime all’attuale livello di base sono direttamente interessate dalla circolazione di acque sulfuree e da una speleogenesi sulfurea acida tutt’ora attiva (Galdenzi, 1990, 2001; Galdenzi et. al., 1997; 1999a; Galdenzi & Maruoka, 2003; Sarbu et al., 2000; Vlascenau et al., 2000; Cocchioni et al., 2003). L’abbassamento della falda sulfurea che ora scorre a quote inferiori (circa 205 m s.l.d.m) ha lasciato il posto al tipico processo epigenico. Infatti attualmente i fenomeni dominanti sono i crolli e la percolazione di acqua meteorica attraverso le zone di debolezza dell’ammasso, (probabilmente legate ai rilasci tensionali avvenuti in seguito all’erosione esterna e incisione della gola), che hanno prodotto spettacolari concrezioni e speleotemi, come i “Giganti” dell’Abisso Ancona, ma anche la “Spada di Damocle” nella Sala Duecento, che tendono a coprire le morfologie ipogeniche sulfuree. Diversamente, quest’ultime, sono ben visibili dalla Sala delle Candeline alla Sala Infinito. Ciò a testimonianza del fatto che la parte del massiccio entro cui si formano queste ultime sale è probabilmente molto meno tettonizzata, fratturata e quindi meno permeabile, rispetto alla parte più esterna e prossima all’ingresso, tanto da non permettere l’infiltrazione delle acque meteoriche e il concrezionamento. Il complesso “Grotta del Fiume- Grotta Grande del Vento” ha quindi origine ipogenica, essendo caratterizzato da morfologie e forme che sono tipiche appunto della speleogenesi sulfurea-acida. Avendo utilizzato come modello per il rilevamento la carta morfologica di Bocchini & Coltorti (1990) è stato inoltre possibile rendersi conto come solo durante gli ultimi vent’anni le ricerche nel campo della speleogenesi abbiano prodotto notevoli risultati e aggiornamenti riguardanti le

morfologie di grotta, e la quasi totale mancanza delle forme più importanti derivanti da processi ipogenici sulfurei nella carta del 1990 lo testimoniano in maniera evidente. Non si era ancora a conoscenza di morfologie come duomi, *replacement pockets*, *megascallops*, zone a “spugna” (*spongeworks*) e *partition walls*, non avendo ancora ben chiaro il processo che avrebbe potuto portare alla formazione di tutto questo. Si hanno solamente pochissimi accenni a forme create a causa dell’azione corrosiva di acque e gas acidi, alle quali vennero assegnati nomi perlopiù generali e puramente descrittivi, come ad esempio “allargamenti diffusi e campi solcati ipogei”; marmitte di corrosione, con forma a calotta, solitamente riempite da gesso; cupole di corrosione con gesso. Vennero fatte d’altra parte altre osservazioni riguardo una possibile formazione ipogenica della grotta, come il reperimento di depositi di gesso nei piani inferiori del complesso (quelli più vicini alla falda sulfurea) e lo sviluppo del sistema in più piani sovrapposti collegati da pozzi verticali e camini (Bocchini & Coltorti, 1990). Per il resto, nella carta morfologica del 1990, ad essere cartografate sono state tutte le forme tipiche del processo, ritenuto fino a quegli anni, il principale fautore della formazione di questo enorme complesso, ossia quello epigenico, come stalattiti, stalagmiti, colonne, colate, concrezioni parietali, cristalli di calcite e così via, che devono la loro origine allo stillicidio di acque meteoriche infiltratesi nella roccia.

Per concludere, il lavoro svolto ha portato alla messa a punto di una nuova carta geomorfologica della zona turista della Grotta Grande del Vento, di Frasassi, in cui il processo sulfureo acido rappresenta il dominante fautore della formazione dell’intero sistema.

8. BIBLIOGRAFIA

- Aiuppa, A., Inguaggiato, S., McGonigle, A.J.S., O'Dwyer, M., Oppenheimer, C., Padgett, M.J., Rouwet, D., Valenza, M., 2005. H₂S fluxes from Mt. Etna, Stromboli, and Vulcano (Italy) and implication for the sulfur budget at volcanoes. *Geochimica et Cosmologica Acta* 69(7), 1861- 1871.
- Bertolani, M., & Cigna, A., 1994. Activity of the scientific commission of "Grotta Grande del Vento" (Genga, Ancona, Central Italy). *International Journal of Speleology*, 23, 1-2, 51-60.
- Bocchini, A., Coltorti, M., 1978. Considerazioni sulla speleogenesi della zona carsica di Frasassi (AN) in relazione all'evoluzione geomorfologica esterna. Preprints XIII Congr. Naz. Speleol., Perugia.
- Bocchini, A., Coltorti, M., 1990. Il complesso carsico grotta del Fiume Grotta Grande del Vento e l'evoluzione geomorfologica della Gola di Frasassi. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia* II(4), 155-180.
- Cattuto, C., & Passeri, L., 1974. Relazioni tra idrologia carsica e litologia nell'area umbro-marchigiana. *Rass. Speleol. It., Mem. XI, Vol.1*, 227-238.
- Cavarretta, G., Lombardi, G., 1992. Origin of sulphur in minerals and fluids from Latium (Italy): isotopic constraints. *European Journal Mineralogy* 4, 1311-1329.
- Cigna, A.A., & Forti, P., 1986. The speleogenetic role of air flow caused by convection. 1st contribution. *International Journal of Speleology*, 15, 41-52.
- Cocchioni, M., Galdenzi, S., Morichetti, L., Nacciarriti, L., & Amici, V., 2003. Studio idrochimico delle acque nel complesso ipogeo di Frasassi. *Le Grotte di Italia*, IV, 49-61. In: Galdenzi, S., (Eds). *Frasassi 1989-2004: gli sviluppi nella ricerca*. UTJ, 70-82.
- De Waele, J., Audra, P., Madonia, G., Vattano, M., Plan, L., D'Angeli, I.M., Bigot, J.Y., Nobécourt, J.C., 2016. Sulfuric acid speleogenesis (SAS) close to the water table: examples from southern France, Austria and Sicily. *Geomorphology* 253, 452-467.
- Egemeier, S.J., 1981. Cavern development by thermal waters. *National Speleological Society Bulletin* 43, 31-51.
- Engel, A.S., Stern, L. A., & Bennett, P. C., 2004. Microbial contribution to cave formation: new insights into sulfuric acid speleogenesis. *Geology* 32 (V), 369-372.
- Forti, P., Menichetti, M., Rossi A., 1989. Speleothems and Speleogenesis of the Faggeto Tondo Cave (Umbria-Italy). *Proceedings X International Speleological Congress, Budapest* 1, 74-76.
- Galdenzi, S., 1990. Un modello genetico per la Grotta Grande del Vento. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia* II(4), 123-142.
- Galdenzi, S., 2001. L'azione morfogenetica delle acque solfuree nelle grotte di Frasassi, Acquasanta Terme (Appennino Marchigiano-Italia) e di Movile (Dobrogea-Romania). *Le Grotte d'Italia* V(2), 49-61.
- Galdenzi, S., 2004a. Guida agli aspetti naturalistici della grotta. In: Galdenzi, S., (Eds). *Le grotte di Frasassi: la genesi, l'evoluzione, l'ambiente e l'ecosistema*. UTJ, 1-57.
- Galdenzi, S., 2004b. Il carsismo nella regione marchigiana. In: Galdenzi, S., (Eds). *Frasassi 1989-2004: gli sviluppi nella ricerca*. UTJ, 6-20.
- Galdenzi, S., Menichetti, M., 1995. Occurrence of hypogene caves in a karst region: examples from central Italy. *Environmental Geology* 26, 39-47.
- Galdenzi, S., & Sarbu, S.M., 2000. Chemiosintesi e speleogenesi in un ecosistema ipogeo: i rami solfurei delle Grotte di Frasassi (Italia Centrale). *Le Grotte d'Italia* V(1), 3-18.
- Galdenzi, S., & Maruoka, T., 2003. Gypsum deposits in the Frasassi Caves, central Italy. *Journal of Cave and Karst studies*, 65(2), 111-125.
- Galdenzi, S., Menichetti, M., 2004b. Il monitoraggio ambientale nelle grotte di Frasassi:

- struttura della rete di acquisizione e nuove indicazioni sul microclima. In: Galdenzi, S., (Ed.). Frasassi 1989-2004: gli sviluppi nella ricerca, 160.
- Galdenzi, S., Menichetti, M., & Forti, P., 1997. La corrosione di placchette calcaree ad opera di acque solfuree: dati sperimentali in ambiente ipogeo. Proceedings of the 12th International Congress of Speleology, I, 187-190.
- Galdenzi, S., Menichetti, M., & Forti, P., 1999(a). L'acquifero solfureo di Frasassi: aspetti idrogeologici e naturalistici. Atti "Conv.Naz. sull'inquinamento delle grotte e degli acquiferi carsici e possibili ricadute sulla collettività". Padova, 1998. Imprimerie, 181-193.
- Hill, C.A., 1990. Sulfuric acid speleogenesis of Carlsbad Cavern and its relationship to hydrocarbon, Delaware Basin, New Mexico and Texas. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 74, 1685-1694.
- Jagnow D.H., Hill C.A., Davis D.G., DuChene H.R., Cunningham K.I., Northup D.E. & Queen J.M., 2000. History of the sulfuric acid theory of speleogenesis in the Guadalupe Mountains, New Mexico. Journal of Cave and Karst Studies, 62(2): 54-59.
- Klimchouk, A.B., 2007. Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphometric perspective. Special Paper 1, National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM, 106 pp.
- Klimchouk A.B., 2017. Types and settings of hypogene karst. In: Klimchouk, A.B., Palmer, A.N., De Waele, J., Auler, A., Audra, P., (Eds.). Hypogene karst regions and caves of the world. Springer, 1-39.
- Machel, H., 2001. Bacterial and thermochemical sulfates reduction in diagenetic settings – old and new insights. Sedimentary Geology 140, 143-175.
- Menichetti, M., 1990. Influenze tettonico strutturali nello sviluppo del carsismo della Gola di Frasassi. Mem. Ist. It. Speleol. II, 4, 65-92.
- Morehouse, D.F., 1968. Cave development via the sulfuric acid reaction. National Speleological Society Bulletin 30(1), 1-10.
- Palmer A.N., 2011. Distinction between epigenic and hypogenic maze caves. Geomorphology, 134: 9-22.
- Palmer, A.N., 2013. Sulfuric acid caves: morphology and evolution. In: Schroder, J, Frumkin, A, (Eds.). Treatise on Geomorphology. Academic Press, Karst Geomorphology, 6: 241-257.
- Passeri, L., 1972. Ricerche sulla porosità delle rocce carbonatiche nella zona di Monte Cucco (Appennino Umbro Marchigiano) in relazione alla genesi della canalizzazione interna. Le Grotte d'Italia IV(3), 5-44.
- Piccini, L., De Waele, J., Galli, E., Polyak, V.J., Bernasconi, S.M., Asmerom, Y., 2015. Sulphuric acid speleogenesis and landscape evolution: Montacchio cave, Albegna river valley (southern Tuscany, Italy). Geomorphology 229, 134-143.
- Plan, L., Tschegg, C., De Waele, J., Spötl, C., 2012. Corrosion morphology and cave wall alteration in an alpine sulfuric acid cave (Kraushöhle, Austria). Geomorphology 169-170, 45-54.
- Santaloia, F., Zuffianò, L.E., Palladino, G., Limoni, P.P., Liotta, D., Minissale A., Brogi, A., Polemio, M., 2016. Coastal thermal springs in a foreland setting: The Santa Cesarea Terme system (Italy). Geothermics 64, 344-361.
- Sarbu, S., Galdenzi, S., Menichetti, M., & Gentile, G., 2000. Geology and Biology of Frasassi Caves in Central Italy, an ecological multi-disciplinary study of a hypogenic underground ecosystem. In: Wikens, H., Culver, D.C., Humphreyes, W.F., (Eds.). Ecosystems of the world. Elsevier, New York, 359-378.
- Tisato, N., Sauro, F., Bernasconi, S.M., Brujin, R.H.C., De Waele, J., 2012. Hypogenic contribution to speleogenesis in a predominant epigenic karst system: A case study

- from the Venetian Alps, Italy. *Geomorphology* 151-152, 156-163.
- Vlasceanu, L., Sarbu, S.M., Summers Engel, A., Kinkle, B.K., 2000. Acidic, cave-wall biofilms located in the Frasassi Gorge. Italy. *Geomicrobiological Journal* 17, 1-15.
- Webster, K.D., Lagarde, L.R., Sauer, P.E., Schimmelmann, A., Lennon, J.T., Boston, P.J., 2017. Isotopic evidence for the migration of thermogenetic methane into a sulfidic cave, Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 79(1): 24-34.

RINGRAZIAMENTI

Arrivato a termine di questo percorso ci tenevo a ringraziare tutte quelle persone che in un modo o nell'altro hanno contribuito al raggiungimento di quest'obiettivo.

Volevo innanzi tutto ringraziare il Professor Jo De Waele, il quale ha fin da subito accettato la mia proposta di poter svolgere la tesi sulle Grotte di Frasassi, argomento a cui mi sento particolarmente legato. Il suo suggerimento mi ha condotto alla realizzazione di una carta morfologica nuova che ha apportato notevoli cambiamenti rispetto alla precedente, redatta nel 1990.

Un ringraziamento speciale va anche alla dottoranda Ilenia D'Angeli, una ragazza gentilissima ed in gamba, che si è sempre dimostrata disponibile ad aiutarmi, e senza la quale questo lavoro non sarebbe mai stato lo stesso.

Un grazie particolare è rivolto al presidente del Consorzio Frasassi, Geniale Mariani, il quale ha appoggiato con entusiasmo questo mio lavoro e mi ha permesso di poter svolgere tutti i miei studi ed osservazioni nelle Grotte concedendomi le autorizzazioni necessarie.

Grazie anche al Consorzio Frasassi, al comune di Genga e a tutta l'amministrazione per avermi concesso cartine, planimetrie e varie autorizzazioni affinché tutto potesse essere svolto senza alcun problema.

Vorrei ringraziare anche Sandro Galdenzi, geologo e speleologo, per avermi fornito del materiale prezioso indispensabile per il procedimento del lavoro, come libri, carte e fotografie.

Un grazie a tutti i fotografi, Martini Andrea, Simonetti Roberto, Nagostinis Maria, Vattano Marco, Lacarbonara Orlando, Antonini Giuseppe, per le meravigliose fotografie scattate, importantissime al fine dell'elaborato.

Un sincero ringraziamento è rivolto ai miei genitori, i quali mi hanno in primis sostenuto economicamente, permettendomi di intraprendere il percorso dell'Università e di poterlo vivere da fuori sede. Per aver inoltre sempre accettato e condiviso le mie scelte supportandomi sempre, facendomi sentire libero di fare ciò che preferivo e facendomi acquisire un forte senso di responsabilità. Grazie anche a mia sorella, la quale mi ha sempre sostenuto durante questo percorso. Un ringraziamento va anche a tutto il resto dei parenti, ai nonni e agli zii, che mi sono sempre stati vicini.

Un grazie particolare ai miei coinquilini, Gemma, Marianna, Luca e Marco con i quali ho condiviso 3 anni magnifici ed indimenticabili e sono stati per me come una seconda famiglia.

Volevo dire grazie anche a tutti i miei più grandi amici di sempre, le persone più importanti: Moric, Cola, Stef, Rob, Andrew, Valerione, Amalia e Arianna. Grazie anche ai due bolognesi d'eccellenza Buio e Gelo, i miei primi due "nuovi amici", che sono stati per me un importante punto di riferimento.