



Analisi morfologica di sistemi carsici tramite software di elaborazione 3D: il caso dei Piani Eterni nel Parco Nazionale Dolomiti Bellunesi, Veneto, Italia

FRANCESCO SAURO¹, DARIO ZAMPIERI²,
MARCO FILIPPONI³

¹ Università di Bologna

² Università di Padova

³ École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Abstract

In the last decade the development of 3D cave topography software has allowed to perform new methods of analysis on the structural and lithological control of karst systems. The 3D statistical analysis of conduit distribution provides identification of strata or structural discontinuities more favorable for the speleogenetic process and the finding of correlations with the geological context of the area. The structural settings, the lithologies and the paleogeographical conditions control directly the morphologic characters and the general shape of an epigenic karst system. The 3D analysis permits to identify inception horizons and to infer the subsequent lowering stages of the paleo-watertable. This study of the Piani Eterni Karst System (Belluno Dolomites) by a 3D approach has demonstrated the validity of this method, detecting the most important paleo-phreatic levels and their relationship with the inception horizons, and the main structural and stratigraphic surfaces.

Keywords

Inception Horizon, Tectonic Inception, 3D Software, Flower Structure, Dolomites

Riassunto

Negli ultimi anni lo sviluppo di software per la resa vettoriale 3D dei sistemi carsici e per la costruzione di modelli geologici, ha permesso di ampliare notevolmente le potenzialità delle analisi di controllo strutturale e litologico dei vuoti carsici. L'analisi tridimensionale dei condotti, in cavità topografate per almeno 5 km di sviluppo spaziale (sistemi di dimensione non locale), permette di individuare le zone di maggiore carsificazione dei massicci carbonatici e di metterle in relazione al contesto geologico della zona. Le caratteristiche morfologiche dei sistemi carsici epigenetici sono controllate da fattori direttamente connessi con l'assetto strutturale dei massicci, le litologie e l'evoluzione paleogeografica dell'area. Grazie ai software di resa 3D è possibile individuare inception horizons da analisi statistiche della distribuzione dei vuoti, ricostruire in tre dimensioni particolari orizzonti stratigrafici e desumere le successive fasi di stazionamento della tavola d'acqua nel sistema carsico.

Lo studio tramite metodologie 3D del Sistema dei Piani Eterni, nelle Dolomiti Bellunesi, ha evidenziato le varie fasi di stazionamento del livello di base, le relazioni tra le paleo-tavole d'acqua con le superfici di controllo stratigrafico e tettonico, fornendo interessanti spunti sull'evoluzione paleogeografia e morfotettonica dell'intero massiccio.

Parole Chiave

Inception horizon, tectonic inception, software 3D, struttura a fiore positiva, Dolomiti

Introduzione

Da ormai oltre un secolo, le tecniche di topografia ipogea utilizzano il classico metodo della “poligonale”, nel quale ad ogni segmento vengono assegnati i tre valori di lunghezza, direzione e inclinazione. Se nel tempo sono migliorati gli strumenti di misurazione (dalla cordella metrica ad esempio ora si è passati al telemetro laser) non sono però cambiati i concetti di base e soprattutto i metodi di rielaborazione successiva dei dati che confluiscono normalmente in tre restituzioni grafiche complementari: la pianta topografica, la sezione longitudinale e le sezioni trasversali dei condotti.

L’analisi di questi tre output è necessaria per avere un’idea di dove, a quali quote e con quali dimensioni si estende il reticolo carsico. La pianta topografica fornisce indicazioni sulla relazione tra i condotti e i fasci di fratture e faglie tettoniche, come la sezione permette di analizzare la distribuzione verticale dei condotti e l’esistenza di piani paleo-freatici.

Negli ultimi due decenni, alla classica elaborazione 2D dei dati si sta affiancando un nuovo approccio di restituzione digitale 3D, grazie alla progettazione di svariati

software. Si tratta di strumenti computazionali molto potenti che permettono di effettuare analisi morfometriche e geometriche, anche su volumi, decisamente difficili da realizzare attraverso il metodo classico.

Con un modello tridimensionale le informazioni di pianta e sezioni si fondono in un unico oggetto (fig.1), nel quale ad ogni segmento possono essere assegnate informazioni specifiche, grazie all’utilizzo di tabelle di attributi. Questo metodo permette quindi di effettuare delle analisi statistiche di distribuzione che possono svelare aspetti interessanti altrimenti difficilmente individuabili con il classico approccio bidimensionale.

Il concetto di Inception Horizon

Nell’affrontare lo studio morfologico e speleogenetico tridimensionale di un complesso carsico è necessario considerare che le masse rocciose carsificabili (calcari, rocce evaporitiche, dolomie, talvolta le quarzareniti) sono pervase da un network geometrico di discontinuità di tipo tettonico (faglie e fratture) e stratigrafico (contatti litologici, piani di strato).

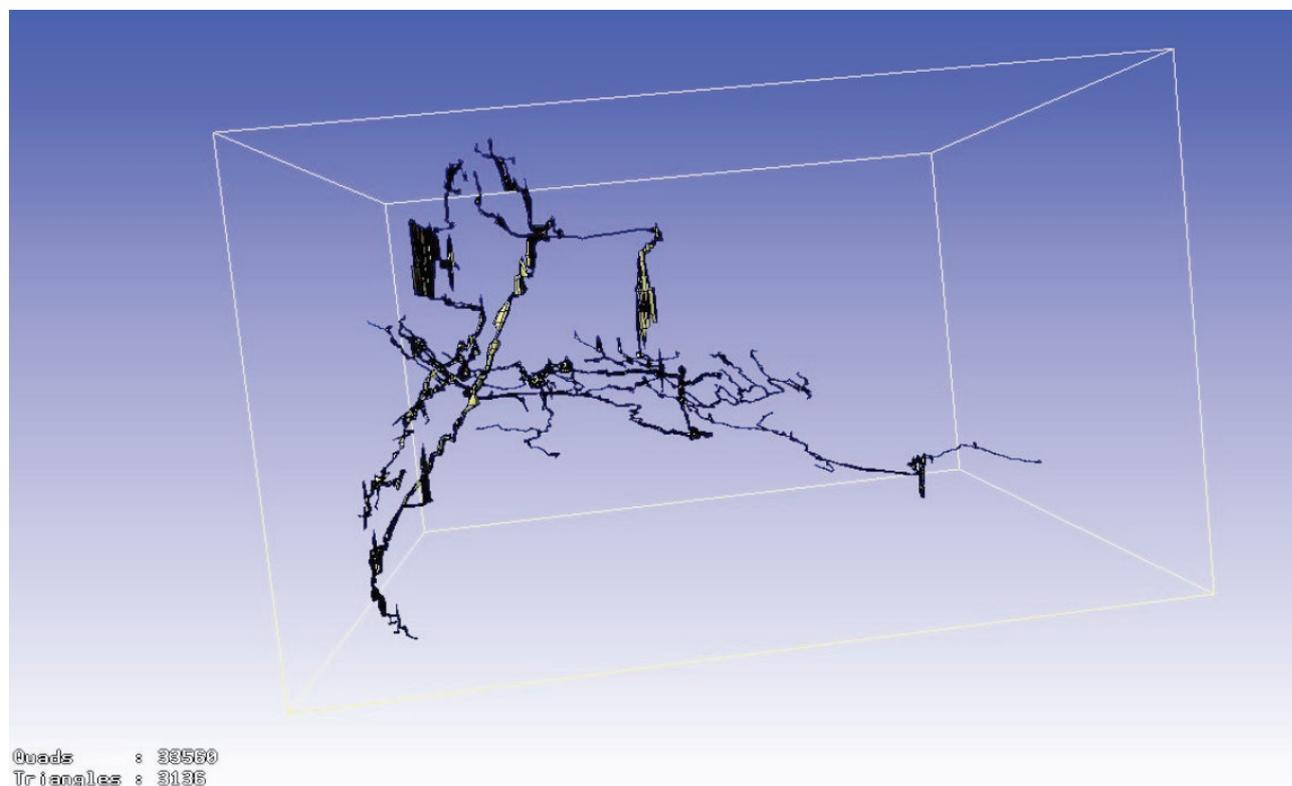


Fig. 1. Rilievo topografico tridimensionale del sistema dei Pianei Eterni, con rappresentati i volumi dei condotti

Fig. 1. The 3D topography of the Pianei Eterni Karst System, with polygon prisms showing the conduit volume

Tuttavia, lo sviluppo dei condotti carsici predilige solo alcune di tali discontinuità, formando reticoli con direzioni e inclinazioni preferenziali (fig. 2). Un passo fondamentale per comprendere quindi la forma di un sistema carsico consiste nell'individuare quegli orizzonti stratigrafici e quelle superfici tettoniche che, per caratteristiche intrinseche, hanno permesso la formazione dei primi vuoti embrionali, per poi dare il via alla formazione dei condotti veri e propri.

Numerosi autori (Lowe, 1992, 2000; Palmer, 1974, 1975, 1989; Ford & Cullingford, 1976) hanno osservato che spesso le cavità carsiche si formano lungo un ristretto numero

di piani di strato o di superfici tettoniche all'interno della serie calcarea regionale. Lowe in particolare, nel 1992, ha introdotto l'ipotesi dell'*inception horizon* (termine difficilmente traducibile in italiano, che corrisponderebbe circa a orizzonte di innesto, ma anche orizzonte primario o iniziale) secondo la quale le fasi iniziali della speleogenesi si sviluppano esclusivamente in alcune parti di una successione rocciosa e più precisamente lungo gli "*inception horizons*", che sono zone "*especially favourable to karstification by virtue of physical, lithological or chemical deviation from the predominant carbonate facies*" (Lowe, 1992).

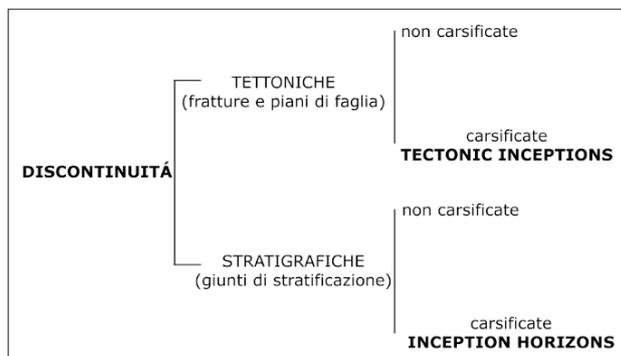


Fig. 2. Schema raffigurante le tipologie di discontinuità e iniezioni

Fig. 2. Different discontinuities and inception types

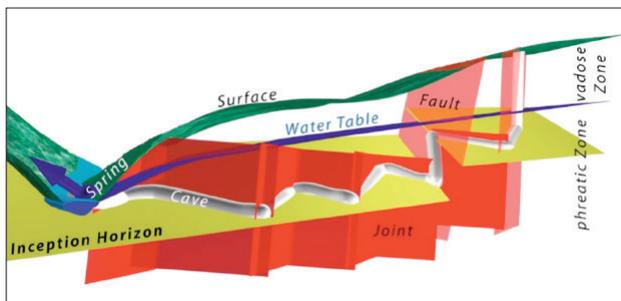


Fig. 3. Rappresentazione schematica tridimensionale di un sistema carsico: la geometria dei condotti freatici è determinata dagli inception horizons, dalle strutture tettoniche e dal gradiente idraulico (modificato da Filippini, 2009)

Fig. 3. Schematic 3D model of a karst conduit system: the geometry of phreatic conduits is determined by inception horizons, joints and faults as well as by the hydraulic gradient

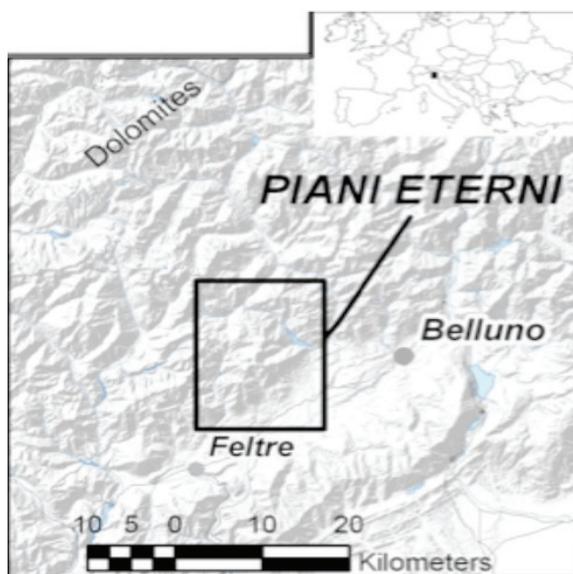


Fig. 4. Localizzazione dei Piani Eterni a nord della Val Belluna

Fig. 4. Geographical settings of the Piani Eterni plateau, to the north of Belluno Valley

L'identificazione di tali "orizzonti" permette di determinare alcuni dei parametri fondamentali che controllano lo sviluppo di un sistema carsico e quindi anche di effettuare previsioni statistiche sullo sviluppo dei condotti in settori ancora inesplorati del massiccio calcareo. Inoltre permette di effettuare osservazioni sulle vie preferenziali di deflusso idrico sotterraneo (fig. 3).

Negli ultimi anni lo sviluppo di *software* per la resa vettoriale 3D dei sistemi carsici e per la costruzione di modelli geologici, ha permesso di ampliare notevolmente le potenzialità della metodologia di analisi del metodo basato sugli *inception horizons*. L'analisi tridimensionale dei condotti, in cavità topografate per almeno 5 km di sviluppo spaziale (sistemi di dimensione non locale), permette di individuare le zone di maggiore carsificazione dei massicci carbonatici e di metterle in relazione al contesto geologico della zona (Filipponi, 2009, Filipponi et al., 2009). È possibile individuare *inception horizons* da analisi statistiche della distribuzione dei vuoti, ricostruire in tre dimensioni particolari orizzonti stratigrafici e desumere le successive fasi di stazionamento della tavola d'acqua nel sistema carsico.

Inoltre tale metodo presenta numerose altre opportunità, anche di carattere applicativo, come l'individuazione di zone a maggior probabilità di concentrazione di vuoti nel corso di escavazione di tunnels o in gallerie minerarie e perforazioni, oltre all'individuazione di vuoti carsificati che potrebbero fungere, in particolari situazioni, da serbatoi per giacimenti di idrocarburi (Filipponi & Jeannin, 2006).

Un particolare caso di studio: il Sistema Carsico dei Piani Eterni

Il Sistema Carsico dei Piani Eterni è attualmente la più vasta e profonda cavità carsica esplorata nel territorio delle Dolomiti (fig. 4), con oltre 30 km di sviluppo e 971 metri di profondità (Salogni, 2004). È costituito da varie cavità connesse: alcuni abissi che si aprono in prossimità di una conca glaciocarsica sull'altopiano sommitale del massiccio (PE10, V35, PE25, PE130, PE3) e una cavità di origine freatica relitta, Grotta Isabella, sezionata lungo il versante orientale dell'altopiano (AA.VV., 2007).

Dal punto di vista stratigrafico l'area si trova al bordo occidentale del Bacino Bellunese e pertanto presenta una successione complessa che va dalla Dolomia Principale alla base del massiccio, alla sequenza, in buona parte dolomitizzata e con alcune formazioni mancanti, del Gruppo dei Calcarei Grigi, fino alla Maiolica e alla Scaglia Rossa del Cretaceo, che però non interessano direttamente il sistema ma solo alcune aree sovrastanti. Nella sequenza stratigrafica si evidenzia per importanza nella speleogenesi un'unità non riconosciuta, detta informalmente Unità Bituminosa (Riva et al., 2008, D'Alberto, 2008), che si trova tra il limite superiore della Dolomia Principale e la Formazione di Monte Zugna (Calcarei Grigi).

Dal punto di vista dell'assetto tettonico l'altopiano di Erera-Brendol-Piani Eterni si situa grossomodo al centro di un corridoio delimitato da due sovrascorrimenti sudver-

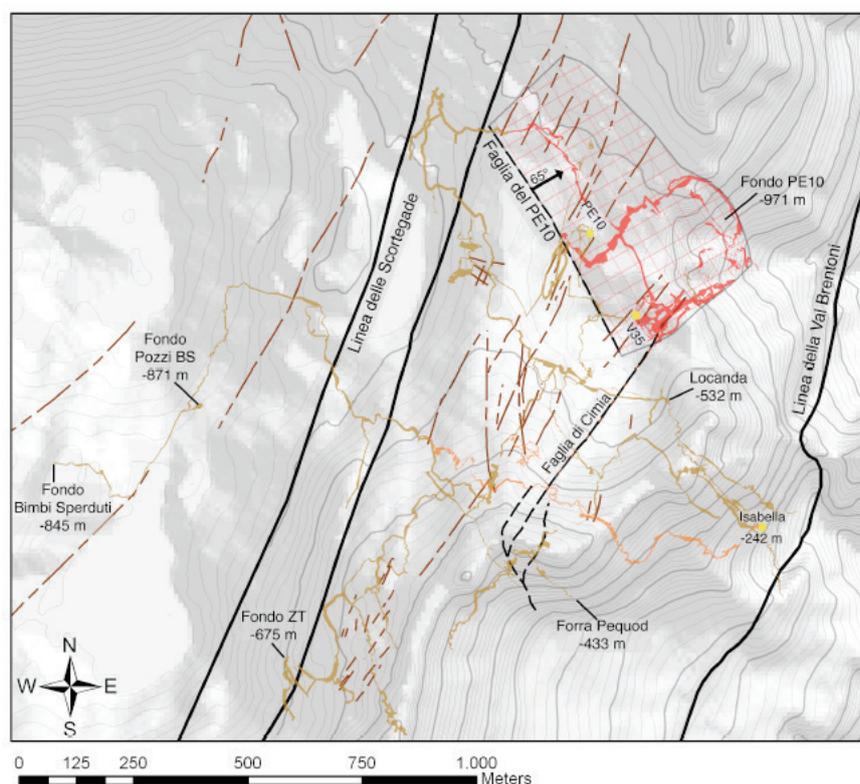


Fig. 5. Carta raffigurante i rapporti tra il sistema carsico (PE10-V35 in marrone, Grotta Isabella in arancione) e le strutture tettoniche. I condotti evidenziati in rosso sono controllati dal piano della Faglia del PE10 (retinato rosso)

Fig. 5. Map showing the relationship between the karst system (PE10-V35 in brown, Isabella Cave in orange) and the tectonic structures. The conduits in red are controlled by the PE10 fault (red net)

genti di importanza regionale: la Linea della Valsugana a nord e la Linea di Belluno a sud, entrambe caratterizzate da un andamento ESE-WNW (D'Ambrogio & Doglioni, 2008).

L'area interessata dal sistema si trova in corrispondenza di una flessione dei sovrascorrimenti che implica che in tale settore la Linea di Belluno si trovi in rampa obliqua (Costa et al., 1996) con conseguente transpressione sinistra (fig. 5). Tale flessura è probabilmente condizionata dall'assetto delle faglie mesozoiche, dato che poco più a est (Masetti & Bianchin, 1987) passava il margine tra la Piattaforma Trentina e il Bacino Bellunese con le faglie normali ad esso associate. La transpressione sinistra si manifesta nell'area dei Piani Eterni con un corridoio di faglie e fratture con orientazioni N30°E, tra cui sono riconoscibili due strutture principali: la Linea della Val Brentoni-Gusela-Cime di Picola e la Linea delle Scortegade. Verso est tale corridoio trascorrente costituisce una struttura a fiore larga quasi 2 km (fig. 6) che a nord si complica per l'iterazione della faglia inversa nord vergente di Pian di Colaz, fino ad esaurirsi contro l'anticlinale Pala Alta-Monte Gena nei Monti del Sole. All'interno di tale struttura a fiore alcuni blocchi risultano sollevati rispetto agli altri, conferendo a quest'area una notevole complessità morfologica.

Metodologia

Per poter effettuare l'analisi 3D del Sistema dei Piani Eterni è stato necessario ricostruire le poligonali dei primi die-

ci chilometri esplorati negli anni '90 a partire da pianta e sezione 2D, utilizzando un metodo di disegno grafico con *software* Autocad Map 2000 in ambiente CAD (Grillo, 2004). Sono state così ricavate oltre un migliaio di "linee fittizie" che hanno permesso di ottenere un modello 3D corrispondente alla pianta e sezioni originali. I dati ricavati sono confluiti nel *software* Visual Topo a cui si sono aggiunte nel tempo tutte le poligonali effettuate nelle successive fasi di esplorazione del complesso. Al 2010 il rilievo 3D dei Piani Eterni è costituito da 3047 tiri di poligonale.

Per quanto concerne la precisione ed i possibili errori insiti in tale modello 3D, soprattutto per la successiva analisi statistica, è importante notare che il rilievo potrebbe essere affetto in alcuni casi particolari da un errore di circa +/- 30 metri in pianta, di +/- 10 metri in senso verticale. In realtà la precisione di molti settori del modello è nella maggior parte dei casi migliore dei +/-10 metri, come dimostrata dalla chiusura di vari anelli di poligonale.

In un secondo momento tutti i dati sono stati trasferiti nel *software* americano Compass, di Fountain Computer Products, ideato da Larry Fish, programmatore CAD e speleologo. Tale programma offre un sistema di archiviazione dei dati più complesso, ma con la possibilità di assegnare maggiori informazioni. Inoltre è accompagnato da dei tools che permettono di effettuare grafici di distribuzione o di esportare il 3D in numerosi formati, compresi shape, vrml, dxf e kml (Keyhole Markup Language, per la visualizzazione su Google Earth).

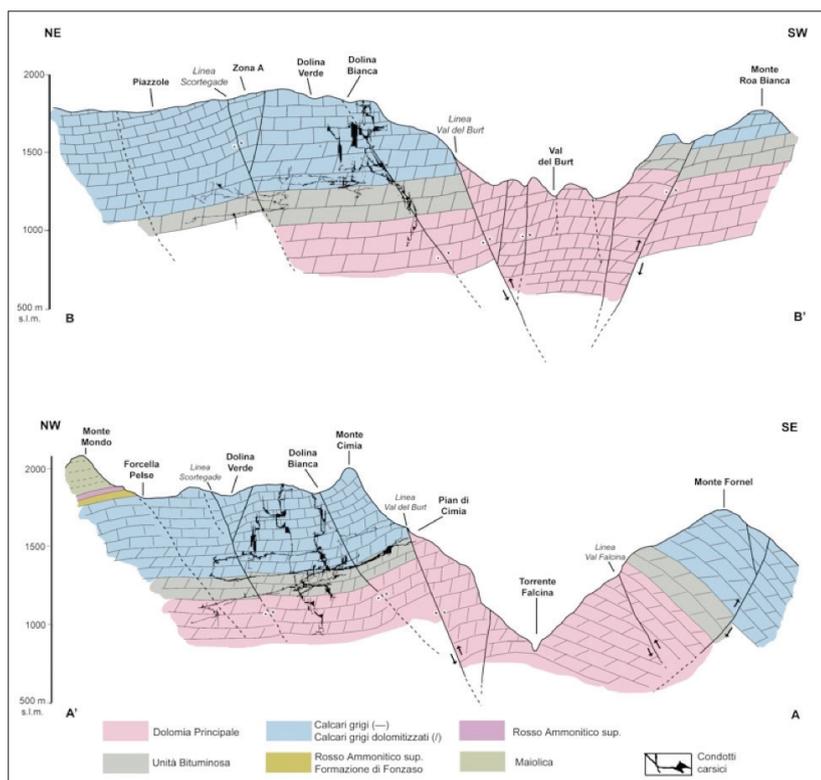


Fig. 6. Sezioni geologiche raffiguranti il sistema carsico nel contesto della struttura tettonica a fiore che caratterizza l'area

Fig. 6. *Geologic sections showing the karst system within the tectonic flower structure that characterises the area*

Una volta ottenuti vari tipi di shape, ad esempio solo dei singoli segmenti lineari, (shots) o degli interi volumi (3Dprisms), attraverso il software ArcGIS, sono stati assegnati ad ogni singolo tratto delle caratteristiche morfologiche desunte dalle osservazioni compiute in profondità durante le esplorazioni o nel corso delle operazioni di rilievo topografico (fig. 7).

Per le analisi 3D del complesso carsico dei Piani Eterni (PE10-V35-Grotta Isabella) sono state individuate 3 classi morfologiche, successivamente suddivise ulteriormente in un totale di 10, in base anche alla loro posizione altimetrica (fig. 8). Le tre classi principali sono:

- condotti di origine vadosa, impostatisi su fratture e piani di strato, ma non su condotti freatici più antichi;
- condotti di origine freatica che non presentano rielaborazioni in regime vadoso, sono cioè relitti di sistemi freatici non riutilizzati come vie di drenaggio idrico all'instaurarsi delle condizioni vadose;
- condotti di origine freatica modificati in condizioni vadose. Tipicamente si tratta di canyon e meandri che hanno conservato in cima l'originale condotto paleo-freatico.

Successivamente a tale classificazione si è passati all'analisi statistica di distribuzione altimetrica e di orientazione

dei condotti di ogni singola classe. Gli obiettivi principali di tale analisi sono:

- evidenziare statisticamente i controlli delle strutture nello sviluppo dei condotti, nei vari settori e alle varie profondità;
- dimostrare l'esistenza di inception horizons o tectonic horizons e cercare di caratterizzarli;
- separare le successive fasi di genesi del sistema, e i progressivi step di abbassamento relativo della zona saturata.

Inoltre, sempre tramite il *software* ArcGIS, è stato realizzato anche un modello che mette in relazione le strutture geologiche dell'area con il rilievo della cavità. In particolare sono state interpolate, in base a dati desunti dall'osservazione diretta in grotta e all'esterno, le tre superfici della Faglia del PE10, del tetto approssimativo dell'Unità Bituminosa e degli interstrati argillosi che controllano le gallerie di -200.

Si è quindi effettuata un'analisi di distribuzione dei condotti non più rispetto alla quota assoluta ma in relazione alla superficie dell'Unità Bituminosa, utilizzando un metodo di discretizzazione del rilievo elaborato da Marco Filippini dell'EPFL di Losanna (Svizzera), tramite un nuovo *software* in via di sviluppo denominato Ca.Su.Da.An. (Cave Survey Data Analyzer) (Filippini, 2009).



Fig. 7. In alto: condotta a sezione ellittica, di origine paleo-freatica. In basso: forra di approfondimento vadoso

Fig. 7. Above: elliptic paleo-phreatic conduit. Below: vadose canyon

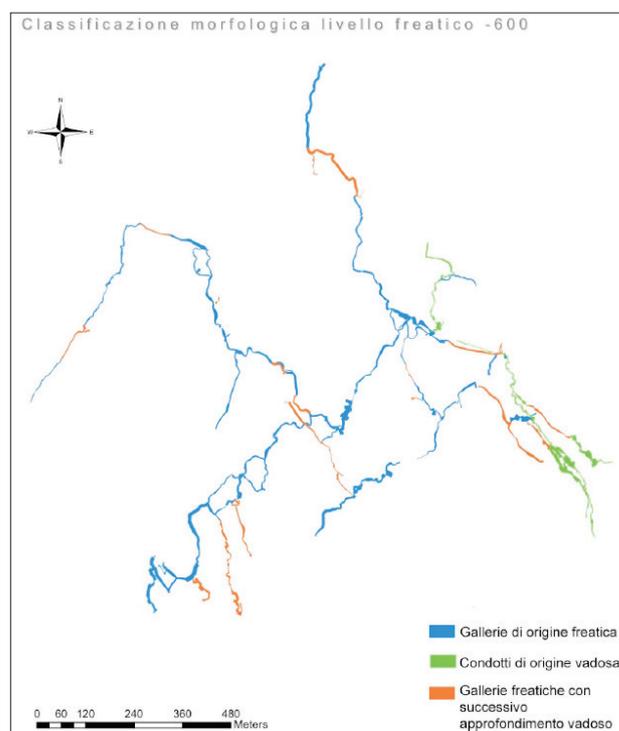


Fig. 8. Esempio di classificazione morfologica del livello paleo-freatico profondo

Fig. 8. Morphological classification example of the lowest paleo-phreatic level.

Risultati dell'analisi 3D

Distribuzione altimetrica dei condotti carsici

È noto che i sistemi carsici profondi presentano, nella maggior parte dei casi, una ben precisa geometria di distribuzione verticale dei condotti. Tale distribuzione è il risultato della sovrapposizione di una serie di sistemi di drenaggio che corrispondono alle diverse condizioni idrogeologiche succedutesi nel tempo (Bögli, 1980; Piccini, 2004). La maggior parte delle gallerie si sono originate inizialmente in condizioni freatiche o epifreatiche. Solo successivamente i flussi vadosi hanno rimodellato parzialmente la sezione di alcuni segmenti e hanno creato un nuovo sistema di vuoti a dominanza verticale che mettono in comunicazione tra loro i condotti freatici posti a quote diverse. In ogni caso però la successiva azione dei flussi vadosi non modifica in modo sostanziale la geometria originale del sistema freatico.

Un insieme di condotti paleo-freatici ad andamento grossomodo orizzontale che si trovano a un dato intervallo di quota viene definito cave level, o tier (Palmer, 2007). Ad ogni "livello" viene normalmente attribuita una particolare fase di stazionamento della falda. In ogni caso è molto difficile separare le diverse fasi, perché è possibile che condotti relativi a due o addirittura tre diversi momenti

si trovino grossomodo alla stessa quota (Filipponi, 2009). Questo perché non necessariamente un livello si sviluppa parallelamente al livello di base, a causa per esempio del controllo nell'approfondirsi del drenaggio freatico da parte di inception horizons non orizzontali (ad esempio un piano di strato inclinato).

Nel caso specifico del complesso dei Piani Eterni (PE10-V35, escludendo Grotta Isabella) la distribuzione verticale generica dei condotti non permette di individuare dei veri e propri livelli (fig. 9, in alto). È possibile solamente osservare una maggiore concentrazione degli sviluppi tra 1450 e 1200 m s.l.m.

Scindendo però il grafico tra distribuzione di condotti esclusivamente freatici (fig 9, in basso) e distribuzione dei condotti esclusivamente vadosi (fig. 9 al centro), si elimina il "rumore" dato da questi ultimi, caratterizzati da una distribuzione verticale abbastanza omogenea.

Prendendo quindi in esame la distribuzione dei condotti della classe morfologica esclusivamente freatica, si evidenziano 8 picchi a diverse quote. È interessante notare come tra il livello di 1840, quelli di 1720-1680 e quelli più profondi, non sono documentati ambienti di origine paleo-freatica. È pertanto possibile suddividere la grotta in tre tiers principali:

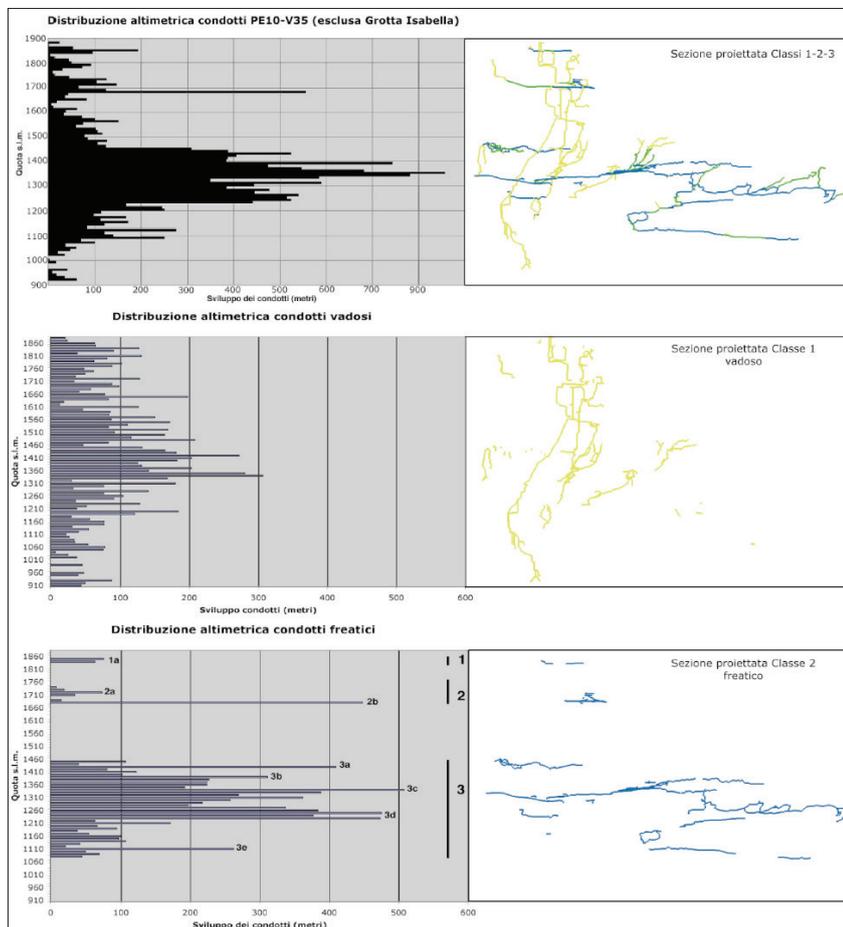


Fig. 9. Analisi di distribuzione altimetrica dei condotti (indistinti, esclusivamente vadosi, esclusivamente freatici) realizzata tramite il rilievo 3D

Fig. 9. Altimetric conduit distribution (all conduits, only vadose conduits, only phreatic conduits) obtained through 3D analysis

- le piccole condotte paleofreatiche di -40 (1840 m s.l.m.), connesse allo sviluppo del reticolo di drenaggio epidermico della Dolina Bianca;
- il livello di condotte che va da -170 a -200 (1710-1680 m s.l.m.), a sua volta suddivisibile in due picchi minori a trenta metri di dislivello tra di loro (2a, 2b);
- il reticolo paleo-freatico profondo, da -450 a -800 (1430-1080 m s.l.m.).

L'ultimo livello, che copre un intervallo di ben 350 metri di dislivello, è suddivisibile a sua volta in 5 picchi principali, che trovano buona corrispondenza altimetrica in alcuni particolari settori di gallerie. Nell'analisi non è stata presa in considerazione Grotta Isabella per non complicare l'elaborazione. Le sue gallerie paleo-freatiche infatti si concentrerebbero in un picco a 1630-1620 m s.l.m., di cui non si ha traccia in altri settori del complesso.

Distribuzione dei condotti in relazione all'Unità Bituminosa

Oltre alla distribuzione altimetrica dei condotti rispetto alla quota sul livello del mare è stata effettuata anche un'analisi della distribuzione dei condotti in relazione alla superficie tridimensionale di tetto dell'Unità Bituminosa. Tale superficie è stata ricostruita in base alla carta geologica ed è stata vincolata altimetricamente a diversi punti della cavità dove è possibile osservare il passaggio litologico tra tale unità e i Calcari Grigi dolomitizzati. Per ottenere

questa particolare distribuzione il rilievo tridimensionale è stato rasterizzato in pixel di 1 m³, ognuno con le proprie caratteristiche di classe vadosa o freatica. Infine l'analisi di calcolo della distanza tra i pixel e la superficie stratigrafica è stata effettuata con il software Ca.Su.Da.An.

L'obiettivo di tale studio è di verificare se esiste un controllo litologico sulla distribuzione dei condotti e quindi verificare se questa particolare superficie può essere considerato un inception horizon vero e proprio.

Nel primo grafico (fig.10, in alto) viene rappresentata l'analisi di distribuzione di tutti i condotti, sia vadosi che freatici, rispetto alla superficie (in ascisse viene espressa in metri la distanza relativa, sopra e sotto alla superficie stratigrafica). È evidentissimo un picco che indica che oltre 2 km di condotti sono posizionati in prossimità di tale superficie, e molti in +/-100 metri di distanza. Nel secondo grafico (fig. 10, in basso) vengono presi in esame solo i condotti freatici. In questo caso il picco è ancora più evidente ed isolato, confermando la caratteristica di inception horizon di tale superficie stratigrafica.

Densità dei condotti: relazioni tra inceptions e posizione della paleo-tavola d'acqua

Oltre alla distribuzione verticale e relativa è possibile elaborare grafici a tre variabili che rappresentano la densità di condotti in relazione alla quota sul livello del mare e alla superficie stratigrafica. Numerosi autori (Bögli, 1980; Audra, 1994; Worthington, 2004; Palmer, 2009) hanno descritto

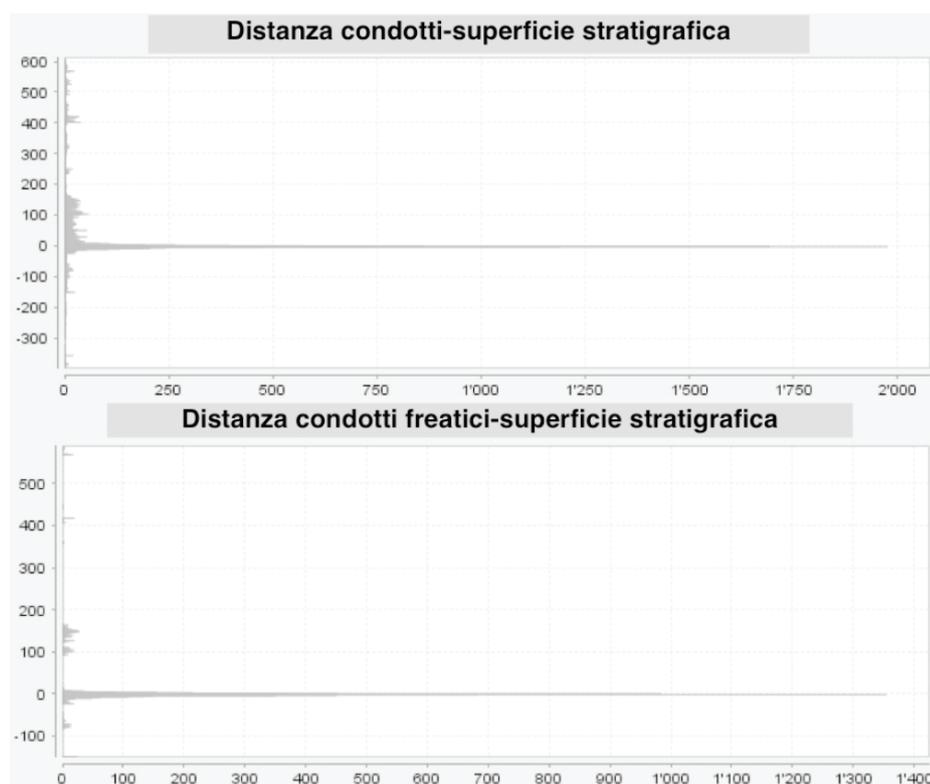


Fig. 10. Distribuzione dei condotti in relazione alla distanza dalla superficie stratigrafica rappresentante il tetto dell'Unità Bituminosa (in ascissa). In ordinata gli sviluppi totali dei pixel (in metri)

Fig. 10. Histogram of the conduit distribution relative to the Bituminous Unit surface with the total development of the conduits at the different distances

svariati casi di sistemi carsici nei quali i condotti paleo-freatici si sono sviluppati in prossimità della (paleo-)tavola d'acqua. È lecito aspettarsi pertanto che la maggior parte dei condotti si sviluppino all'intersezione tra la superficie di interfaccia freatico-vadoso e gli inception horizons (fig. 11).

La distribuzione altimetrica lungo il livello 3 risulta continua (poiché controllata dall'immersione degli strati dell'Unità Bituminosa) ma non omogenea. Tramite la distribuzione altimetrica, ma soprattutto grazie ai grafici di densità dei condotti lungo l'Unità Bituminosa (fig. 12), è possibile riconoscere almeno 4 picchi di concentrazione dello sviluppo dei condotti (3b-3c-3d-3e). Si tratta in prevalenza di grandi gallerie paleo-freatiche che rimangono orizzontali seguendo grossomodo lo strike della stratificazione e un importante set di fratture parallelo all'asse della Piega di Cimia.

Tra un livello di gallerie e l'altro si sviluppano condotti paleo-freatici inclinati, controllati dall'immersione degli strati, che presentano dimensioni nettamente minori rispetto ai condotti orizzontali. È quindi possibile che tali livelli di gallerie rappresentino successive fasi di stazionamento della falda. Esse si sono formate all'intersezione tra la superficie piezometrica e l'inception horizon, probabilmente in condizioni epifreatiche (evidenza di sifoni a collo d'oca). I vari livelli non sono nettamente distinti in quanto la carsificazione si sviluppava comunque in profondità lungo gli inception horizon, e l'abbassamento del livello doveva essere graduale e non istantaneo.

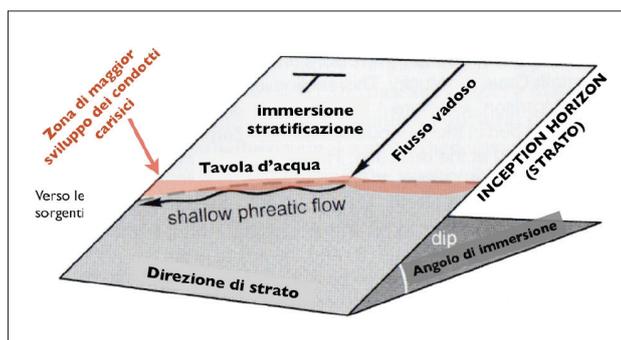


Fig. 11. Disegno rappresentante l'intersezione della tavola d'acqua con l'inception horizon. Mentre i flussi vadosi si muovono lungo l'orizzonte seguendo la massima pendenza, il flusso freatico si muove lungo l'inception horizon seguendo il gradiente idraulico (modificato da Palmer, 2007)

Fig. 11. Scheme showing the intersection between the water table and an inception horizon. While the vadose component flows along the dip, the phreatic component moves along the inception horizon following the hydraulic gradient

Orientazioni preferenziali e water flow dei condotti nei distinti livelli

Un'altra analisi che è possibile effettuare grazie al rilievo tridimensionale è quella dell'orientazione preferenziale dei condotti nei singoli livelli paleo-freatici. L'analisi statistica degli orientamenti dei condotti permette di correlare la configurazione del sistema carsico con l'assetto delle discontinuità, della giacitura della stratificazione e dei gradienti idraulici attuali e passati.

Nell'elaborazione dei dati si assume, con buona approssimazione, che i tiri di poligonale maggiori o uguali a 5 metri di lunghezza siano effettivamente rappresentativi dell'orientazione di un condotto rilevato. Tali orientazioni preferenziali saranno il risultato del controllo nella speleogenesi di discontinuità geometriche come fratture, piani di faglia, piani di strato, in combinazione con il gradiente idraulico della falda che dirige i flussi idrici in una direzione media prevalente (Palmer, 2007).

Inoltre è possibile elaborare un rose diagram costituito dalle direzioni di pendenza negativa di ogni segmento di poligonale, denominato water flow. Esso rappresenta la tendenza di flusso delle acque nei condotti in condizioni di gravità. Raffigura quindi le direzioni di flusso in condizioni vadose, mentre quelle in condizioni freatiche possono essere influenzate da altri fattori, come appunto il gradiente della tavola d'acqua, che non necessariamente è orientato nella direzione di massima pendenza del reticolo carsico.

Riportiamo solo tre esempi caratteristici di controllo dell'orientazione che servono per capire diverse situazioni possibili:

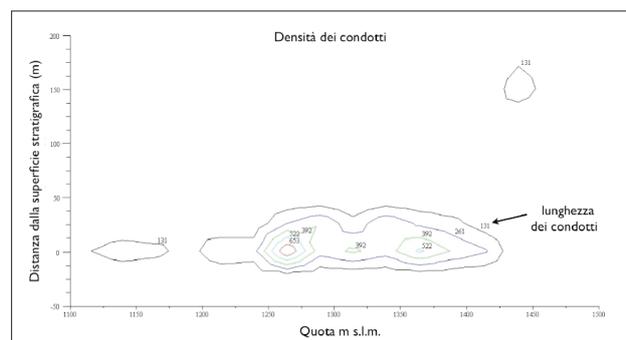


Fig. 12. Grafico di densità dei condotti esclusivamente freatici sull'Unità Bituminosa

Fig. 12. Density plot of the paleo-phreatic conduits on the Bituminous Unit surface

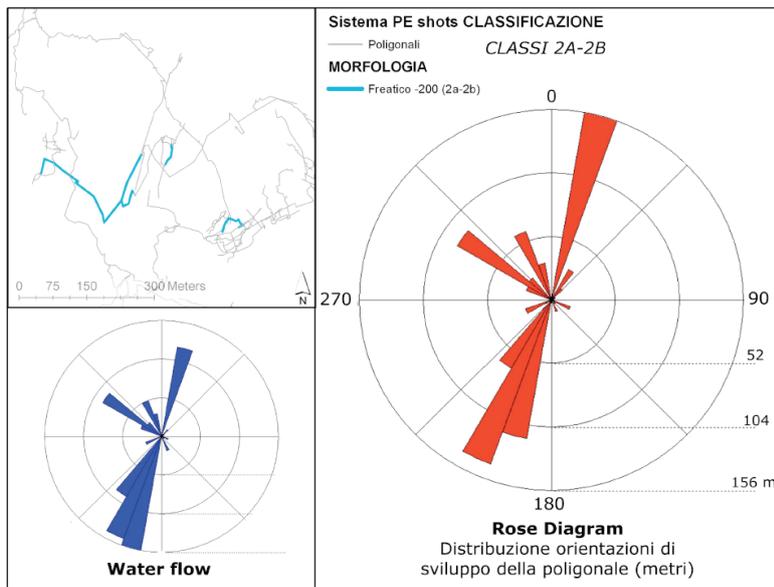


Fig 13. Orientazione dei condotti e flussi idrici: Livelli 2a-2b, Condotte di -170 e -200
Fig. 13. Conduit orientation and water flow: 2a-2b levels, galleries at 170 and 200 meters of depth

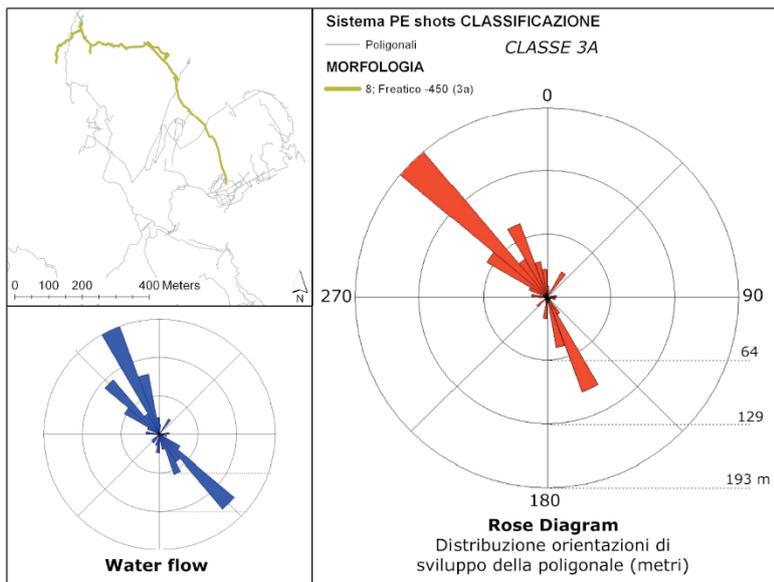


Fig 14. Orientazione dei condotti e flussi idrici: Livello 3a, Gallerie a Sud Est e a Nord Ovest
Fig. 14. Conduit orientation and water flow: 3a level, SE and NW galleries

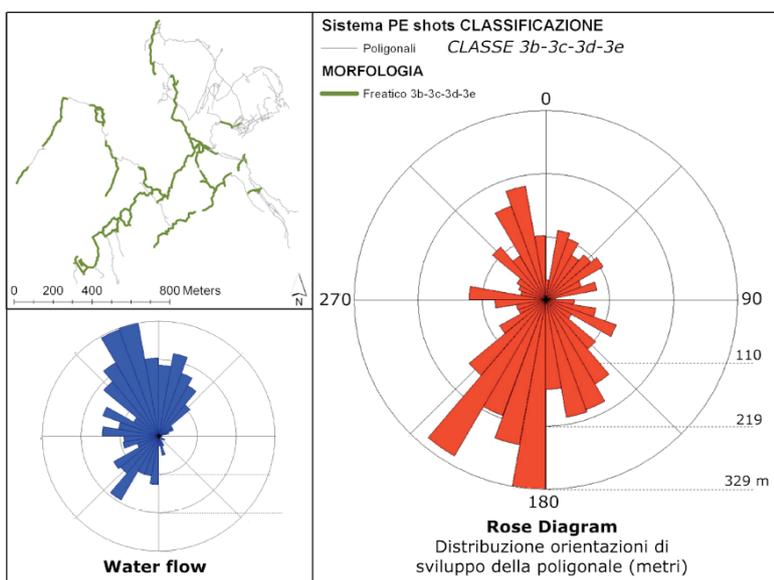


Fig. 15. Orientazione dei condotti e flussi idrici: Livello 3b-3c-3d-3e, Reticolo paleo-freatico profondo
Fig. 15. Conduit orientation and water flow: 3a-3c-3d-3e galleries, deep paleo-phreatic level



– Livelli 2a-2b – Condotte di –170 e –200 (fig. 13)

Questi due livelli sono controllati da fasci di fratture N10°E e N30°E. Ad essi si aggiungono però altre due direttrici: la direzione N35°-40°W, legata all'influenza della Faglia del PE10, e la direzione N50°W osservabile anche in superficie. Tali livelli di gallerie paleo-freatiche sono chiaramente impostati su due interstrati di 1-2 cm di argille verdi. È evidente però che il controllo della stratificazione nelle direzioni di sviluppo è subordinato al controllo dei fasci di fratture principali. Risulta quindi che l'incrocio tra fratture e l'inception horizon (l'interstrato argilloso), rappresenta il principale elemento di controllo nello sviluppo del reticolo paleo-freatico. Il water flow è in prevalenza da NNE verso SSW, come ci si dovrebbe aspettare data l'immersione verso SSW della stratificazione nella zona del plateau dei Piani Eterni.

– Livello 3a – Gallerie a Sud Est e a Nord Ovest (fig. 14)

Questo livello è impostato lungo la direzione del piano della Faglia del PE10. Ci si dovrebbe quindi aspettare un'unica direzione prevalente. È evidente però che il rose diagram è caratterizzato da due picchi distinti a N30°W (direzione del piano principale) e N45°W. È probabile che nello sviluppo di tali condotti talvolta prevalga l'influenza di fratture secondarie al piano principale, in particolare di fratture R. Tale alternanza tra passaggi lungo il piano principale e fratture secondarie a basso grado dal precedente (10°-15°) è ben osservabile nelle Gallerie a Nord Ovest. Questo livello di gallerie, a differenza di quelli sopra descritti, non si sviluppa in prossimità di interstrati argillosi, ma lungo un'ondulazione del piano di faglia che porta alla formazione di pochi metri di flat a basso angolo rispetto all'inclinazione media della struttura. Tale ondulazione nella geometria è probabilmente la causa dell'apertura, durante il movimento tettonico, di vuoti embrionali su cui si sono impostati poi i flussi freatici. Si tratta quindi di un tectonic inception.

Il water flow non fornisce indicazioni di flussi prevalenti, dato anche che la maggior parte di questo livello si presenta con un andamento a saliscendi, tipico di condizioni sature.

– Livello 3b-3c-3d-3e – Reticolo paleo-freatico profondo (fig. 15)

Il reticolo profondo presenta una distribuzione delle orientazioni dei condotti molto varia. Nel rose diagram si possono riconoscere due zone di concentrazione delle direzioni, una secondo l'immersione generale degli strati dell'Unità Bituminosa (condotti freatici che scendono lungo l'immersione della stratificazione) e una grossomodo perpendicolare. Quest'ultima è parallela a una piega locale (Piega di Cimbia), con direzione N30°-35°E e corrisponde anche al set di fratture più frequentemente osservabile in superficie in tale settore. I livelli 3b, parte del 3c (Isola) e 3d sono chiaramente maggiormente controllati da tale direttrice rispetto all'immersione della stratificazione, con flussi idrici

che, all'osservazione delle morfologie freatiche, sembra si muovessero pressoché orizzontalmente da NE verso SW. È probabile quindi che in questo caso abbiano giocato un ruolo fondamentale nella speleogenesi la concomitanza di due fattori: la presenza di un inception horizon (giunti di stratificazione dell'Unità Bituminosa) e il fascio di fratture parallele all'asse della piega. Oltre a queste due direttrici se ne osserva una terza, verso sud, che corrisponde all'andamento del Tunnel del Vento e della prima parte della Galleria dei Cinghiali. In quella zona l'influenza della Piega di Cimbia è nulla e la stratificazione immerge verso SSE. È probabile quindi che tale direttrice sia controllata quasi esclusivamente dall'immersione dell'Unità Bituminosa in quel settore. Il water flow, come ci si dovrebbe aspettare, è prevalentemente in direzione dell'immersione degli strati. Ciononostante la componente NE-SW è ben riconoscibile e rappresenta probabilmente l'originale direzione del flusso freatico.

Conclusioni

Il metodo di analisi statistica di topografie di sistemi carsici attraverso l'utilizzo di software per la resa 3D apre delle prospettive molto interessanti nello studio della speleogenesi di vaste aree carsiche e alla correlazione tra di esse.

Il problema principale che più frequentemente si incontra, nel caso si volesse utilizzare questi nuovi metodi per studi di carattere speleologico, geologico o geografico, risiede nel fatto che di molti rilievi effettuati negli anni passati, sono stati conservati solo gli elaborati grafici di output (presso i catasti regionali), mentre i dati grezzi di poligonali, necessari per l'elaborazione del modello tridimensionale, sono purtroppo andati perduti. Si può risolvere questo problema ricostruendo le poligonali direttamente su pianta e sezione, ma si aggiunge un ulteriore grado di soggettività all'analisi.

Un altro aspetto problematico è l'assegnazione degli attributi morfologici, che viene effettuato non dal software ma direttamente dall'operatore. Pertanto per l'utilizzo di tale metodo è richiesta comunque una buona conoscenza della cavità che permetta di effettuare la classificazione con una certa sicurezza. In ogni caso da un singolo sistema carsico è evidente che si possono estrarre moltissime informazioni che possono rafforzare o proporre nuove interpretazioni rispetto alle osservazioni effettuate direttamente sul campo. Pertanto l'analisi con approccio tridimensionale è destinata a diventare in futuro uno strumento fondamentale per comprendere l'evoluzione di aree e sistemi carsici. È presumibile inoltre che sottoponendo a tale analisi sistemi adiacenti, o in aree regionali distinte, sarebbe possibile effettuare correlazioni che probabilmente rivelerebbero interessanti informazioni, sottolineando la diversa evoluzione delle distinte aree e individuando gli elementi comuni.

BIBLIOGRAFIA

- AA. VV., 2007 – PE10, *Piani Eterni*. Speleologia Veneta, 15: 35-50.
- AUDRA P., 1994 – *Karsts alpins. Genèse des grands réseaux souterrains. Exemples: le Tennengebirge (Autriche), l'île de Crémieu, la Chartreuse et le Vercors (France)*. Karstologia Mémoires, 5, 279 pp.
- BÖGLI A., 1980 – *Karst hydrology and physical speleology*. Berlin, Springer-verlag, 284 p.
- COSTA V., DOGLIONI C., GRANDESSO P., MASETTI D., PELLEGRINI G.B., TRACANELLA E., 1996 – *Foglio "Belluno" 1:50.000. Note illustrative del F. 063 Belluno*. Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Servizio Geologico Italiano: 1-74.
- D'ALBERTO L., 2008 – *Hettangian ammonite from the Trento Platform-Belluno Basin edge (Sottogruppo Pizzocco Brendol, Eastern Southern Alps)*. Rendiconti online Soc. Geol. It., 4: 33-36
- D'AMBROGI C., DOGLIONI C., 2008 – *Struttura delle Vette Feltrine*. Rendiconti online Soc. Geol. It., 4: 37-40.
- FILIPPONI M., 2009 – *Spatial Analysis of Karst Conduit Networks and Determination of Parameters Controlling the Speleogenesis along Preferential Lithostratigraphic Horizons*. Tesi di Dottorato, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- FILIPPONI M., JEANNIN P., 2006 – *Is it possible to predict karstified horizons in tunneling?* Austrian Journal of Earth Sciences, 99: 24-30.
- FILIPPONI M., JEANNIN P., TACHER L., 2009 – *Evidence of inception horizons in karst conduit networks*. Geomorphology, 106: 86-99.
- FORD D.C., CULLINGFORD C.H.D., 1976 – *The Science of Speleology*. Academic Press, 593 p.
- GRILLO B., 2005 – *Il modello tridimensionale del Bus della Genziana (1000 V TV)*, Speleologia Veneta 12: 179-188.
- LOWE D.J., 1992 – *The origin of limestone caverns: an inception horizon hypothesis*. Manchester Metropolitan University, Ph.D. thesis, 512 p.
- LOWE D.J., 2000 – *Role of stratigraphic elements in speleogenesis: the speleo inception concept*. In: Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N., DREYBRODT W. (eds): *Speleogenesis, evolution of karst aquifers*: 65-76.
- MASETTI D., BIANCHIN G., 1987 – *Geologia del Gruppo della Schiara (Dolomiti Bellunesi)*. Memorie Scienze Geologiche Padova, 34: 187-212.
- PALMER A.N., 1974 – *Geologic influence on cave passage orientation in Ludington cave, Greenbarrier County, West Virginia*. Proc. of the West Virginia 4th Conference on Karst Geology and Hydrology, West Virginia geol. Survey: 33-40.
- PALMER A.N., 1975 – *The origin of maze caves*. Bulletin of the National Speleological Society of America 37/3: 56-76.
- PALMER A.N., 1989 – *Stratigraphic and structural control of cave development and groundwater flow in the Mammoth Cave region*. In: White W.B., White E. (eds): *Karst Hydrology, Concepts from the Mammoth Cave Area*, Von Nostrano Reinhold, New York: 293-316.
- PALMER A.N., 2007 – *Cave geology*. Cave books, Dayton (USA), 453 p.
- PICCINI L., 2004 – *Morfologia ed evoluzione dei sistemi carsici delle Alpi Apuane*. Istituto Italiano di Speleologia, Memoria 18: 21-41.
- RIVA A., PERISSINOTTO M., D'ALBERTO L., ZOPPELLO C., 2008 – *Geology of the Piani Eterni Karst Complex*. Rendiconti online Soc. Geol. It., 4: 71-74.
- SALOGNI M. (Ed.), 2004 – *Le Grotte dei Piani Eterni*. Gruppo Speleologico Valdobbiadene, Gruppo Speleologico CAI Feltre, Agorà Libreria Editrice, 168 p.
- WORTHINGTON S.R.H., 2004 – *Hydraulic and geological factors influencing conduit flow depth*, Cave and Karst Science 31/3: 123-134.