

Dati preliminari sull'assetto tettonico e fessurativo dei versanti carbonatici interessati da sinkhole nell'Appennino centro-meridionale

*Preliminary data about tectonic setting and joint pattern of the carbonate
slopes and related sinkholes (Central-Southern Apennines)*

DI CRESCENZO G. (*), SANTO A. (**)

RIASSUNTO - I sinkhole sono depressioni legate a sprofondamenti improvvisi sia in roccia che in materiali sciolti. Si tratta di fenomeni imprevedibili che possono creare situazioni di rischio soprattutto nelle aree vallive e pedemontane urbanizzate.

Negli ultimi tempi la ricerca ha mostrato un grande interesse verso questi fenomeni. In particolare gli studi condotti sui sinkhole carsici dell'Appennino centro-meridionale hanno permesso di appurare l'importanza delle caratteristiche geologiche, tettoniche, idrogeologiche e sismiche delle aree interessate.

Al momento rimane ancora poco chiara la genesi dei sinkhole anche se i dati raccolti farebbero propendere maggiormente per fenomeni di ipercarsificazione che portano alla formazione di microcavità e ad un forte decadimento delle proprietà fisico-meccaniche generali dell'ammasso roccioso. Quest'ultimo aspetto è confermato dai risultati preliminari contenuti nella presente nota che fa riferimento ad alcuni siti ricadenti in Penisola Sorrentina e nei Monti di Caserta. Qui è stata verificata la presenza di numerosi sinkhole che si aprono su versanti poco carsificati ma altamente fratturati impostati su importanti linee di faglia.

I dati raccolti anche se non chiariscono del tutto il meccanismo genetico dei sinkhole suggeriscono che le aree maggiormente suscettibili sono quelle porzioni di versanti calcarei con presenza di estese fasce cataclastiche e prossime all'emergenza di falde.

Per tali settori una corretta pianificazione territoriale dovrà prevedere studi geologici ed indagini dettagliate anche ai fini di possibili fenomeni di amplificazione sismica locale.

PAROLE CHIAVE: doline da crollo; tettonica; caratterizzazione geomeccanica; Italia meridionale

ABSTRACT - Sinkholes are steep-sided, closed depression resulting from a sudden collapse of either hard rocks or soft materials. They are unpredictable phenomena and may originate geological risk conditions, especially in valley areas and foothills, often urbanized.

Research in recent years has shown a great interest in these phenomena. In particular, studies carried out in the southern-central Apennines put out in evidence the main geological, tectonic, hydrogeological and seismic factors controlling their origin and evolution.

At the moment their genesis still remains unclear even if collected data suggests a very strong widespread karstification as the main controlling factor. This process causes the formation of numerous microcavities, and a strong deterioration of the rock mass physical-mechanical properties.

Results of mesostructural analyzes conducted in the Sorrentine Peninsula and Caserta Mts., contained in this note, confirm this hypothesis. In these areas, sinkholes have opened up within elongated land strips consisting of very fractured carbonatic rocks (fault damage zone). The already low rock mass physical-mechanical properties have been made worst by karst processes due to the presence of mineral waters flowing up along active faults.

The identification of collapse prone areas should be considered in territorial planning. In these areas detailed geological studies should be envisaged in relation to possible seismic amplification phenomena.

KEY WORDS: karst sinkhole; tectonic; geomechanical characterization; southern Italy

(*) PhD Università di Napoli "Federico II" (e-mail: g.di.crescenzo@alice.it)

(**) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale (Sezione di Geologia Applicata), Università di Napoli "Federico II", Italy (e-mail: santo@unina.it)

1. - PREMESSA

È sempre più crescente l'interesse della ricerca per lo studio dei sinkhole in quanto rappresentano un fattore di rischio soprattutto a causa della loro imprevedibilità.

Il termine sinkhole, originariamente introdotto con riferimento a depressioni circolari in aree carsiche (FAIBRIDGE, 1968; MONROE, 1970), è stato esteso in letteratura anche per indicare sprofondamenti connessi alla presenza di cavità antropiche (BECK, 1984, BERTI *et alii*, 2002) nonché a voragini in terreni granulari delle piane alluvionali (NISIO, PARISE & FLOREA, 2007).

Nel caso delle aree carsiche, la più recente e completa classificazione dei sinkhole è quella proposta da WALTHAM *et alii*, (2005) che suddivide i fenomeni in sei tipologie: *solution*, *collapse*, *caprock*, *dropout*, *suffosion*, *buried sinkhole*.

Anche in Italia negli ultimi decenni sono stati documentati fenomeni di sprofondamento che hanno originato depressioni sub circolari soprattutto in aree pianeggianti, spesso urbanizzate CARANNA *et alii*, 2008; NISIO, 2008.

Meno studiati sono i sinkhole di origine carsica che interessano le rocce carbonatiche ed, in particolare, zone montane poco urbanizzate. A tale riguardo CORNIELLO & DE RISO, 1986 in un lavoro sull'idrogeologia e idrochimica delle sorgenti dell'agro telesino, individuano sul colle calcareo di Montepugliano un elevato numero di doline da collasso la cui origine è associata alla presenza di acque mineralizzate della falda cui sono associati fenomeni di ipercarsismo.

Nel 1995, CORNIELLO & SANTO, svolgendo uno studio sulle problematiche geologiche connesse ai fenomeni di dissesto della basilica benedettina di S. Angelo in Formis, segnalano la presenza di trincee e di doline da crollo con forma ellittica lungo i versanti settentrionali del Monte Tifata nel casertano.

BUDETTA *et alii* (1996), e SANTO & TUCCIMEI (1997), nell'ambito di una ricerca sui fenomeni deformativi lungo versanti carbonatici associati a fenomeni carsici, focalizzano l'attenzione su due doline da sprofondamento localizzate nel comune di Vico Equense in Penisola Sorrentina e nella valle

del F. Sele nei pressi dell'area termale di Contursi nel comune di Buccino, in località Pianelle. In entrambi i casi gli Autori ipotizzano come cause predisponenti e concomitanti alla loro formazione la presenza di vuoti carsici, lo stato di intensa fratturazione e carsificazione degli ammassi, la presenza di manifestazioni termali e termominerali che favoriscono l'instaurarsi di fenomeni di ipercarsismo. Gli stessi autori segnalano altresì una correlazione tra le aree interessate da sinkhole e l'occorrenza di forti *shock* sismici.

Una prima sintesi su larga scala della distribuzione delle morfologie da sinkhole in Campania è contenuta in DEL PRETE *et alii*, 2004 cui fanno seguito una serie di approfondimenti su siti specifici (SANTO *et alii*, 2007; DEL PRETE *et alii*, 2008a, 2008b, 2010a, 2010b). In particolare in MAFFEI *et alii*, (2005) e SANTO *et alii*, (2007) ribadiscono che la genesi degli sprofondamenti sia da correlare a fenomeni di dissoluzione carsica molto spinta, in aree fortemente fratturate e caratterizzate da alta sismicità.

Più recentemente, infine, uno studio di sintesi sull'Appennino centro-meridionale (SANTO *et alii*, 2011) ha confermato la localizzazione dei sinkholes in aree con peculiari caratteristiche tettoniche ed idrogeologiche. In particolare viene evidenziata la presenza contemporanea di importanti faglie regionali in buona parte attive, di falde sotterranee che alimentano gruppi sorgivi spesso mineralizzati e di una significativa sismicità storica.

Nei lavori contenuti nel rapido excursus bibliografico appena esposto non viene però ancora chiaramente discussa e/o dimostrata la genesi dei sinkhole soprattutto per la mancanza di indagini specifiche (geomeccaniche, geochimiche, esplorative ecc.) e per la difficoltà logistiche ed economiche ad esse correlate dal momento che dovrebbero essere raggiunte profondità notevoli. Risulta anche difficile approcciare il problema sinkhole in termini previsionali e per il loro monitoraggio dal momento che si sa ancora poco sulle eventuali deformazioni precedenti al collasso.

Il presente studio pone l'accento sull'aspetto geostrutturale, tettonico e fessurativo dei versanti carbonatici dell'Appennino centro-meridionale in

cui si aprono i sinkhole sottolineando, in via preliminare, il ruolo certamente non secondario che esso gioca sulla loro genesi. In particolare vengono evidenziati alla macroscala alcuni versanti di faglia cui si associano i sinkhole e, per alcune fenomenologie, i risultati preliminari cui si è giunti tramite studi a carattere geomeccanico alla mesoscala degli ammassi rocciosi.

2. - LE AREE A MAGGIORE CONCENTRAZIONE DI SINKHOLE E RELATIVO ASSETTO TETTONICO

In un recente studio condotto sull'Appennino centro-meridionale (SANTO *et alii*, 2011) sono stati censiti 220 sinkhole distribuiti in 15 macroaree (tab. 1). Essi si sviluppano essenzialmente nella fa-

Tab. 1 - Macroaree con maggiore concentrazione di sinkhole: I B = bordo di conca intramontana; B CP = bordi di piane costiere; CS = versanti carbonatici (Da SANTO *et alii*, 2011).

- High sinkhole concentration area (by SANTO *et alii*, 2011) I B = border of intramontane basin; B C P = border of coastal plain; Cs = carbonate slope (from SANTO *et alii*, 2011).

Macroarea	Massiccio	N° di rif. sinkholes	Litologia	Contesto geomorfologico	Comune
1	Monti Reatini	13	4: Miocene and Paleogene calcarenites	I B	Paterno
			3: Liassic dolomitic limestones		S. Vittorino
2	M. Ocre	24	9: Cretaceous limestones	I B	L'Aquila
			9: Quaternary sediments covering limestones		Fossa, Stiffe
3	M. San Cosimo	5	3: Quaternary sediments covering limestones	I B	Prezza, Sulmona
			2: Miocene and Paleogene calcarenites		
4	Monti Lucretili	11	Miocene and Paleogene calcarenites	CS	Percile, Orvinio
5	Monti Duchessa	4	4: Jurassic and Cretaceous dolomitic limestones	IB	Castelmenardo
					Corvaro
6	Monti Tranquillo – S. Nicola	33	31: Cretaceous limestones	CS	Alvito, Campoli
			2: Quaternary conglomerates covering limestones		
7	Monti Cassino	17	17: Cretaceous and Paleogene limestones	CS	Cassino, Atina
8	Monti Ernici	11	11: Cretaceous limestones	CS	Acuto, Collepardo
9	Monti Lepini	18	18: Cretaceous and Paleogene limestones	B C P	Norma, Sezze, Cori Priverno
10	Monti Aurunci	16	16: Cretaceous and Paleogene limestones	CS, BCP	Suio, Santi Cosma e Damiano
11	Monti di Venafro	13	2: Cretaceous limestones	I B, CS	Venafro, Sesto Campano
			7: Giurassic dolomitic limestones		
			4: Quaternary conglomerates covering limestone		
12	Monti di Caserta e Tifata	17	17: Cretaceous limestones	B C P	Caserta, Maddaloni
13	Monti Matese – Camposauro	22	12: Cretaceous limestones	I B	Telese, Solopaca
			10: Quaternary conglomerates covering limestone		
14	Monti Lattari	8	8: Cretaceous limestones	B C P	Castellammare Stabia, Equo
15	Monti Marzano	9	6: Cretaceous and Jurassic limestones	I B	Contursi, Buccino
			3: Quaternary conglomerates covering limestone		
Total		220			

scia medio-alta di versanti calcarei cretaci e giurassici o nella fascia pedemontana nei detriti di falda che li ricoprono.

In tutte le macroaree individuate è stato effettuato uno studio geostrutturale alla macroscale che ha permesso di riconoscere i principali lineamenti tettonici presenti. In particolare, l'analisi di fotografie aeree di dettaglio e rilievi mirati di campagna hanno permesso di censire le faglie presenti in un intorno significativo nonché la loro direzione. In ogni macroarea i sinkhole si sviluppano preferenzialmente all'interno di fasce allungate parallelamente alle faglie bordiere o, comunque, ad una distanza non molto elevata dalla faglia principale posta generalmente nella zona pedemontana del versante strutturale.

Nelle figure 1, 2, 3 sono riportati alcuni stralci topografici con le ubicazioni dei sinkhole che interessano i versanti carbonatici dell'Appennino centro-meridionale. Si può osservare come essi si allineano seguendo fasce strette e allungate riconducibili con molta probabilità a settori cataclastici correlati a *master fault* (SANTO *et alii*, 2001).

Si segnalano significative concentrazioni di sinkhole lungo il versanti carbonatici tirrenici che delimitano sia la Piana Pontina che quella di Fondi. Essi si allineano secondo direzioni appenniniche per una lunghezza di alcune decine di chilometri.

In Abruzzo le maggiori concentrazioni si hanno sui versanti carbonatici che limitano la media valle del F. Aterno dove si distribuiscono seguendo almeno tre importanti lineamenti tettonici ad andamento appenninico nelle zone di Roio Piano, Fossa, Onna e San Demetrio. In questo caso le faglie hanno lunghezze variabili da 2 a 10 km.

Più a sud, sul versante occidentale dei monti del Matese, i sinkhole si allineano ancora una volta in direzione appenninica nella zona di Raviscanina e, in direzione E-W, nella zona di Pratella.

Fasce cataclastiche con trend appenninici e concentrazione di sinkhole sono ancora bene evidenti nelle aree in cui ricadono Vico del Lazio, Venafro e Teleso così come più a sud ad Oliveto Citra e Pianelle. Nella zona di Bellona-Triflisco la distribuzione dei sinkhole segue ancora fasce in cui si riscontrano ammassi rocciosi molto fratturati secondo allineamenti N150 mentre el caso di Castel

S. Angelo a Paterno e Solopaca si distribuiscono a ridosso di faglie antiappenniniche.

In sintesi i sistemi fessurativi spesso associati a *master fault* su cui si impostano i sinkhole sono quelli con direzione N 120 ovvero appenninica (fig. 4).

Analisi geostrutturali effettuate sulle pareti dei sinkhole e sui principali sistemi di discontinuità rilevati al loro interno, evidenziano molto spesso trend con direzioni trasversali alla faglia bordiera.

Un primo risultato cui si giunge quindi è che a grande scala gli sprofondamenti si sviluppano secondo faglie prevalentemente con direzione appenninica e localmente i fenomeni sono favoriti dall'incrocio di più sistemi di faglia con direzione sia appenninica che antiappenninica.

3. - ASSETTO DELL'AMMASSO ROCCIOSO ALLA MESOSCALA

Come è noto i sinkhole presentano morfologie caratterizzate da ripide pareti spesso non facilmente raggiungibili. In alcuni dei sinkhole con forma svasata ricadenti nelle macroaree campane è stato possibile accedere nelle depressioni ed analizzare preliminarmente lo stato fessurativo dell'ammasso roccioso alla mesoscala.

Tutte le pareti dei sinkhole in cui è stato possibile accedere risultano estremamente fratturate tant'è che raramente è stato possibile apprezzare l'originaria stratificazione.

In taluni casi le pareti presentavano l'aspetto tipico di una cataclite con evidenze di alterazione e dissoluzione carsica quali piccole cavità (esempi di Sparanise, di Teleso e della Penisola Sorrentina).

Sono stati analizzati dati provenienti da alcune perforazioni eseguite sul fondo dei sinkhole (Vico Equense in Penisola Sorrentina), da estendimenti geomeccanici (Penisola Sorrentina) e da prove *in situ* del tipo sclerometrico (Monti Tifatini e di Caserta).

Mancano al momento studi mesostrutturali e prove geomeccaniche su campioni indisturbati. Nel primo caso si stanno approntando approcci che adattino metodi di classificazione empirica (RMS, RMR, RMI, GSI) basati sulla analisi statistica di alcuni fattori misurati secondo gli standard internazionali (I.S.R.M., 1978) con metodi utiliz-

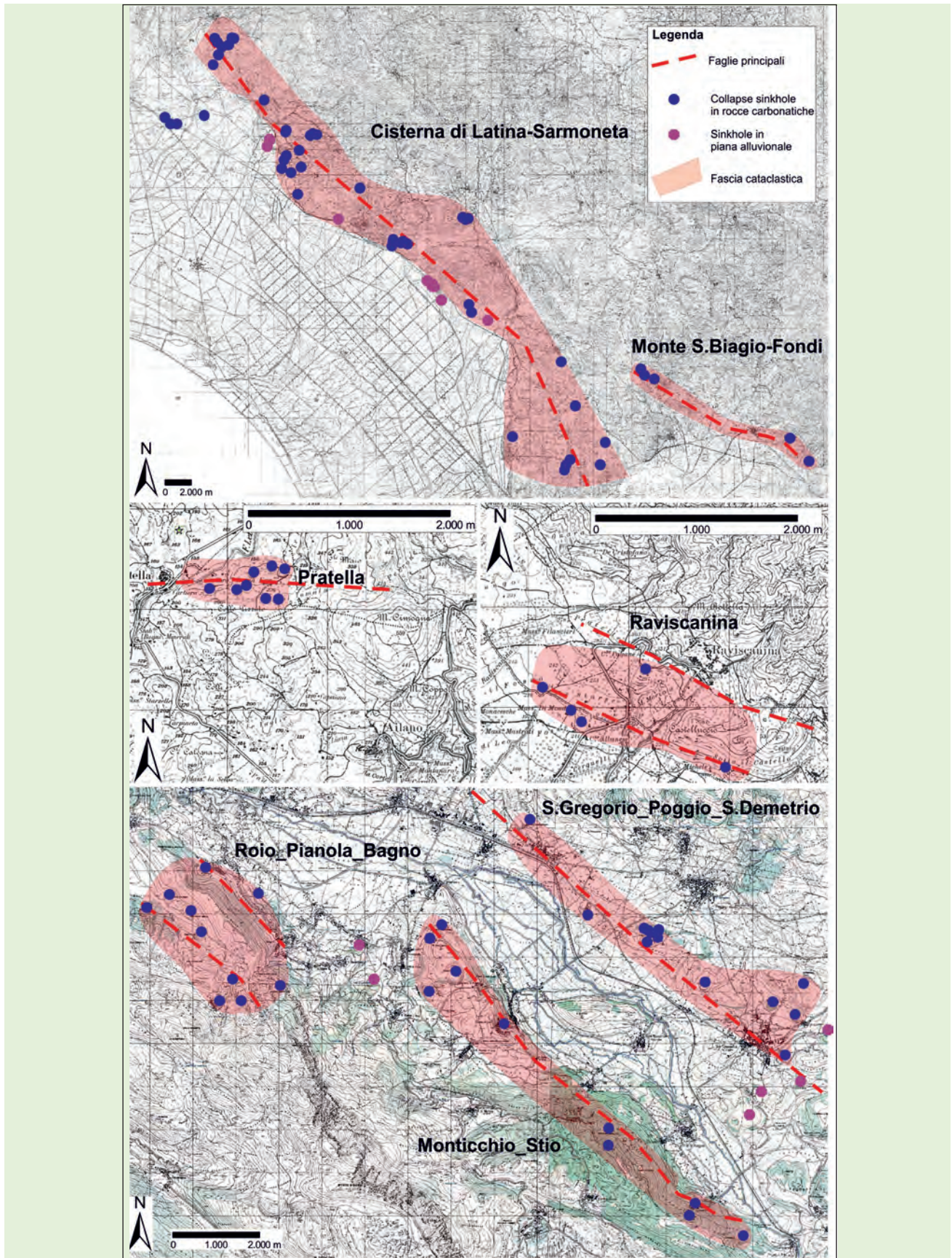


Fig. 1 - Ubicazione dei sinkhole nelle macroaree 2, 9, 11 e relative fasce cataclastiche. I numeri delle macroaree si riferiscono alle aree riportate in tabella 1.
 - Sinkhole location in the macroareas 2, 9, 11 and related damage zones. Numbers refer to the areas shown in table 1.

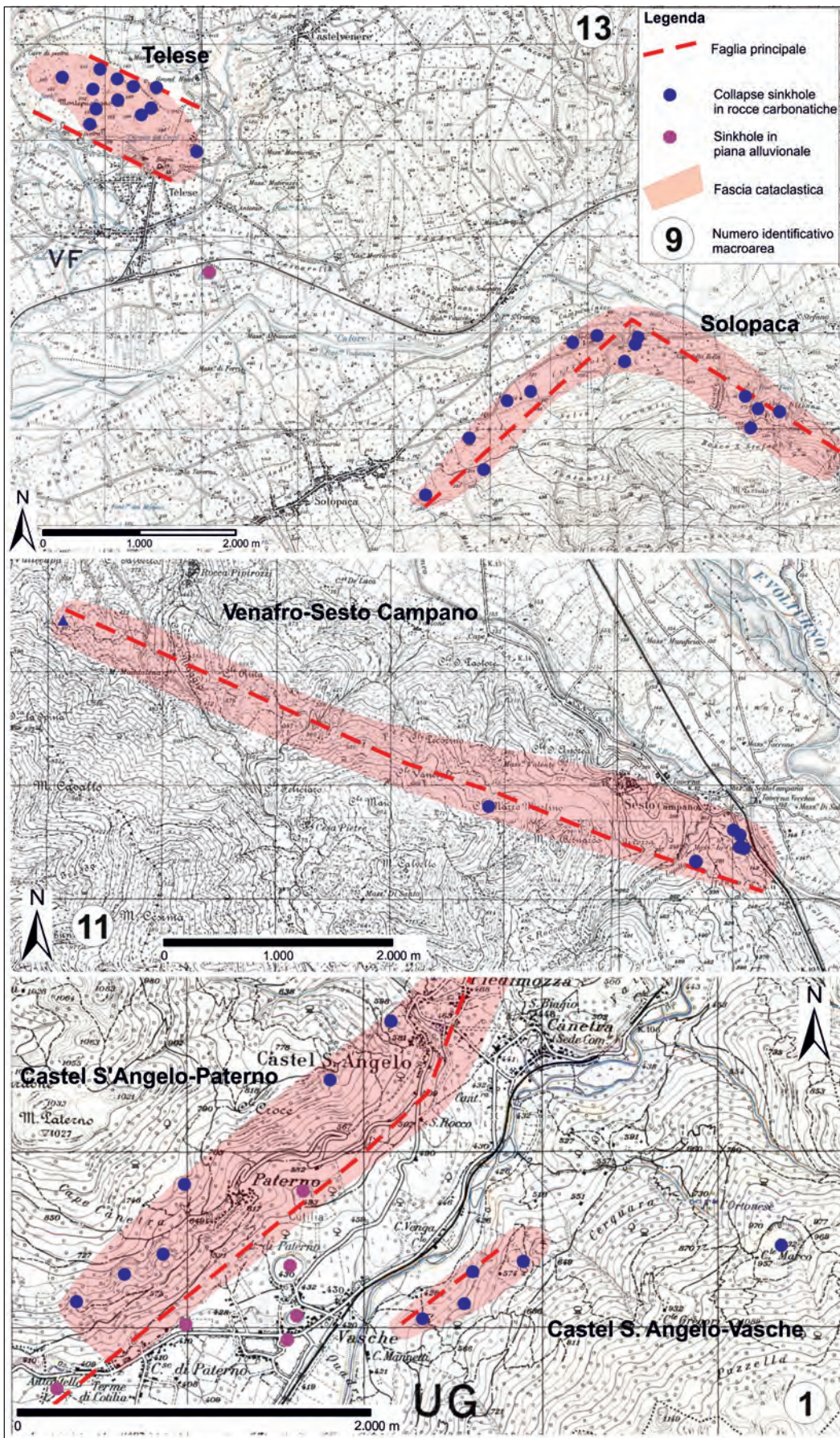


Fig. 2 - Ubicazione dei sinkhole nelle macroaree 1, 11, 13 e relative fasce cataclastiche. I numeri delle macroaree si riferiscono alle aree riportate in tabella 1.

- Sinkhole location in the macroareas 1, 11, 13 and related damage zones. Numbers refer to the areas shown in table 1.

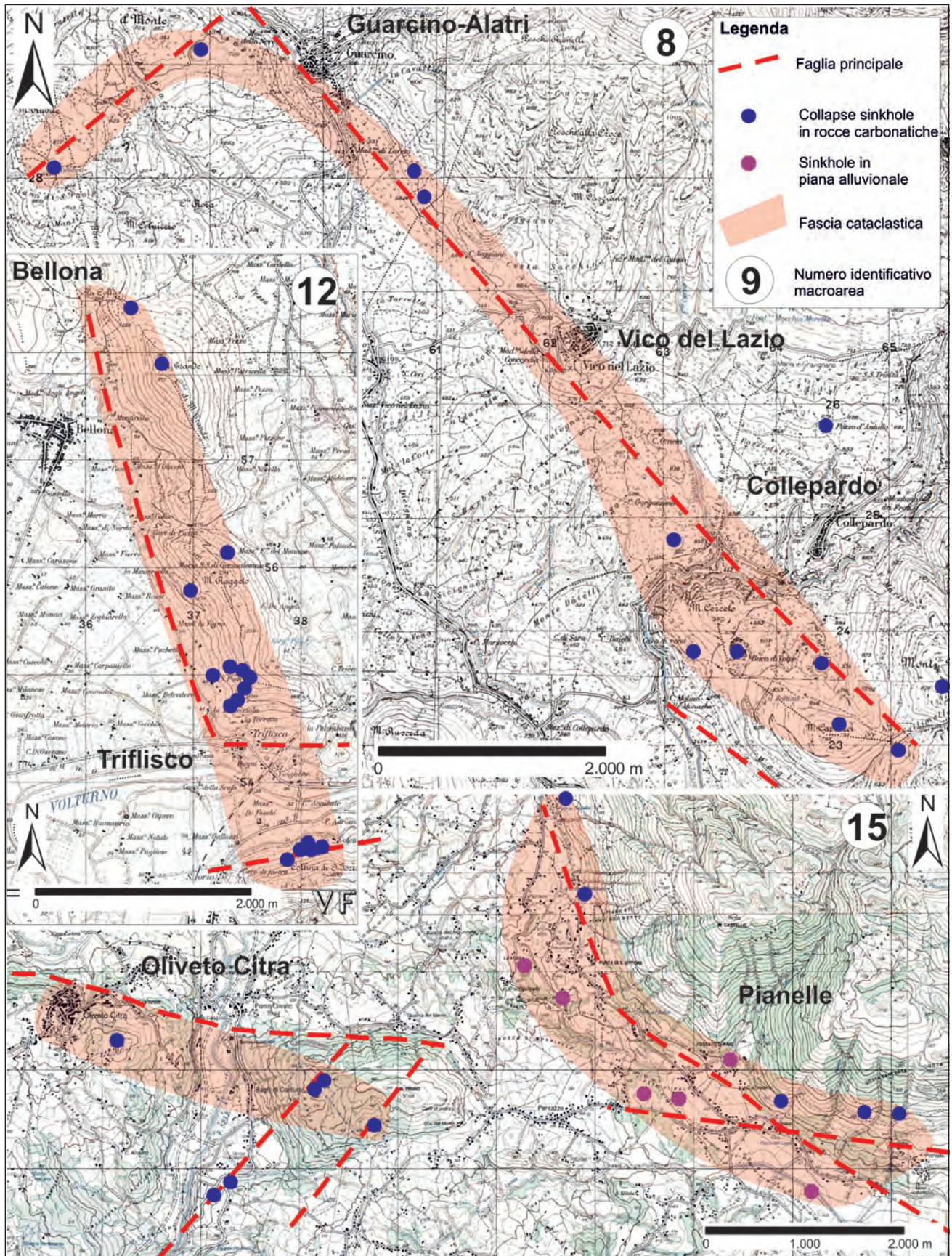


Fig. 3 - Ubicazione dei sinkhole nelle macroaree 8, 12, 15 e relative fasce cataclastiche. I numeri delle macroaree si riferiscono alle aree riportate in tabella 1.
 - Sinkhole location in the macroareas 8, 12, 15 and related damage zones. Numbers refer to the areas shown in table 1.

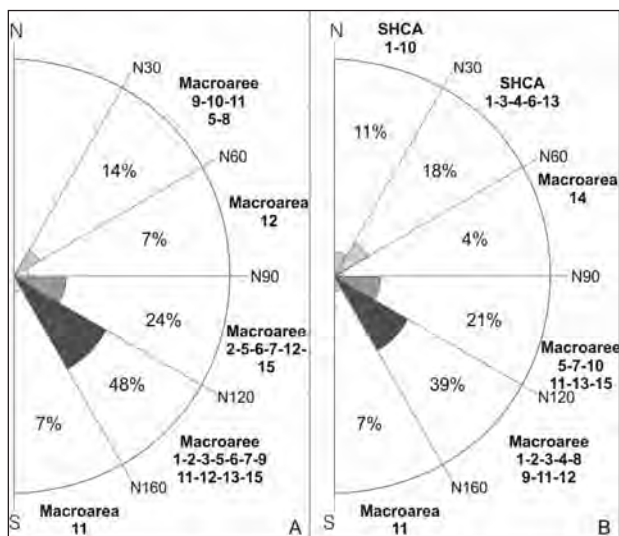


Fig. 4 - A) Direzione della faglia principale su cui si sviluppano i sinkhole; B) allineamento preferenziale delle pareti dei sinkhole (da SANTO *et alii*, 2011) - Fault orientation (A) and sinkhole alignment (B) frequency diagrams (from SANTO *et alii*, 2011).

zati in caso di ammassi molto alterati o molto disturbati tettonicamente (PALMSTRÖM, 1995; HOEK *et alii*, 1998; MARINOS & HOEK, 2001). Per quanto attiene invece le prove di laboratorio si sta per procedere al prelievo di campioni indisturbati in punti differenziati contenuti in un intorno significativo dei sinkhole.

Di seguito si riportano i risultati preliminari ricavati in alcune aree di studio.

3.1. - L'AREA DEI MONTI TIFATINI E DEI MONTI DI CASERTA

Nell'area compresa tra i comuni di Casapulla, Casagiove e San Prisco sono stati riconosciuti oltre 15 fenomeni da *collapse* sinkhole (COZZOLINO *et alii*, 2011). Essi raggiungono un diametro di circa 150 m ed una profondità di 30 m come nel caso del sinkhole in località Cientopertose (fig. 5).

Gli sprofondamenti nella parte meridionale dell'area si impostano su calcari cataclastici del Cretaceo mentre nel settore settentrionale si sono formati su calcari dolomitici del Giurassico meglio stratificati. Tutti si allineano lungo le faglie principali che bordano il rilievo di Monte Tifata seguendo fasce cataclastiche (figg. 5, 6).

Nella zona di Masseria del Colonnello, sui versanti esposti verso la Piana Campana, ai sinkhole

ivi presenti si associano sovente fratture beanti profonde oltre i 20 m con apertura di circa 2 m (fig. 6). La genesi di tali fratture, come del resto già evidenziato in altri contesti, è molto probabilmente legata a fenomeni gravitativi di trazione verificatisi successivamente agli sprofondamenti (BUDETTA *et alii*, 1996; MARTINO & PRESTININZI, 2004; COZZOLINO *et alii*, 2007; DEL PRETE *et alii*, 2010).

Sulle pareti interne dei sinkhole, infine, all'estrema fratturazione dovuta all'intersezione di numerosi piani di faglia lungo i quali si sviluppano fasce cataclastiche si associano cavità carsiche. Queste ultime raggiungono dimensioni di alcuni metri cubi ed in alcuni casi anche di alcune centinaia di metri cubi (fig. 7).

3.1.1. - Il sinkhole di Cientopertose

Il sinkhole di Cientopertose si trova nei pressi di San Prisco nel territorio comunale di Casagiove nel distretto provinciale di Caserta.

Nel sinkhole di Cientopertose è stata compiuta un'accurata analisi geomorfologica e geologico strutturale che ha permesso di individuare tre aree con un grado crescente di fratturazione. Si passa infatti da un ammasso cataclastizzato ad est in cui si riscontra anche una forte presenza di cavità o scavarnamenti con dimensioni variabili. Verso ovest si passa ad una fascia di transizione posta grossomodo a cavallo di un grande liscione di faglia ed, infine, ad una roccia da poco a mediamente fratturata (fig. 8).

In via preliminare nei vari settori della parete interna con direzione NE-SW si è proceduto alla definizione della resistenza a compressione uniassiale mediante prove sclerometriche.

Il martello di Schmidt, noto come sclerometro, è ampiamente utilizzato come prova non distruttiva volta a misurare la "durezza di rimbalzo" della roccia. Dalla prova si ricava l'indice di rimbalzo "r" che è possibile correlare alla resistenza a compressione uniassiale.

La proporzionalità tra la resistenza a compressione uniassiale (σ_c in MPa) e l'indice di rimbalzo (r) può essere descritta dalla seguente relazione (BARTON & CHOUBEY, 1977):

$$\log_{10}(\sigma_c) = 0.00088 * \gamma * r + 1.01$$

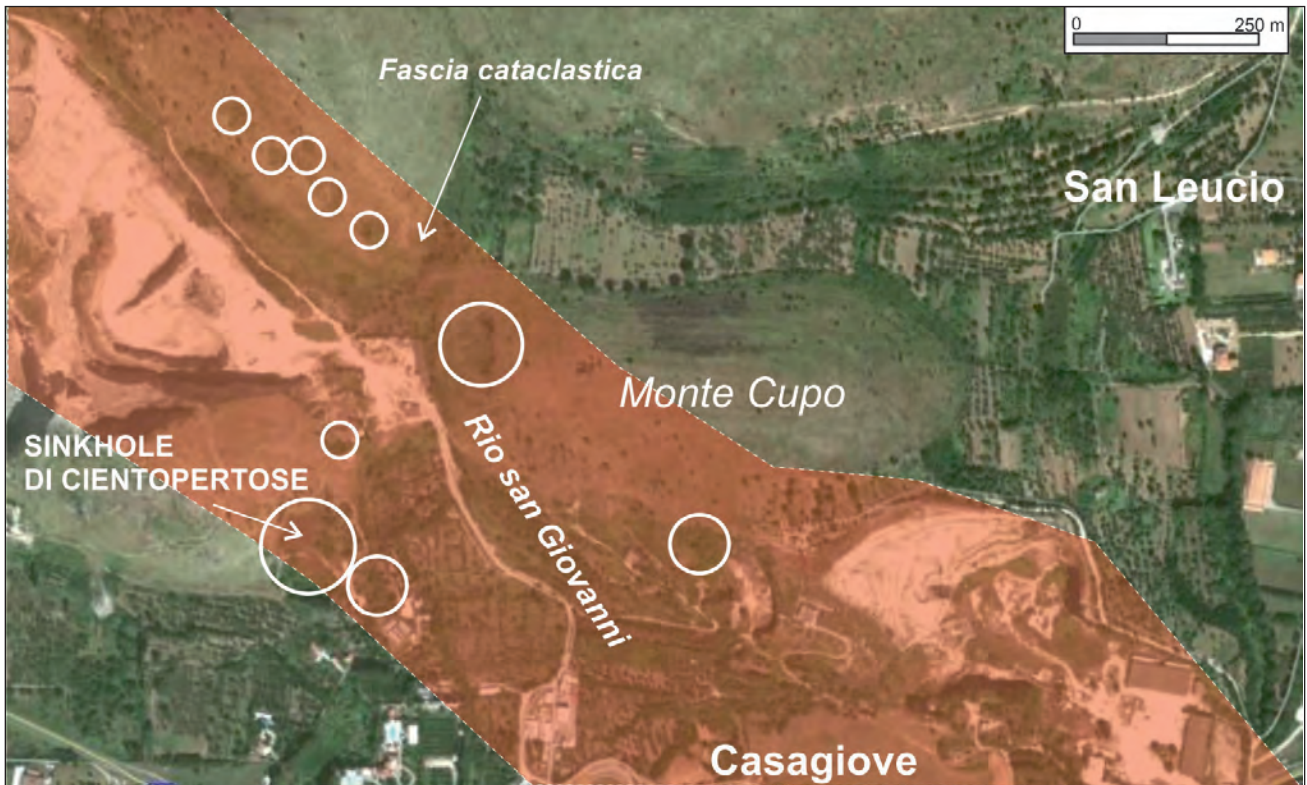


Fig. 5 - Ubicazione dei sinkholes nella zona di Casagiove (CE) (da COZZOLINO *et alii*, 2011).
 - Sinkholes location in the Casagiove area (CE) (from COZZOLINO *et alii*, 2011).

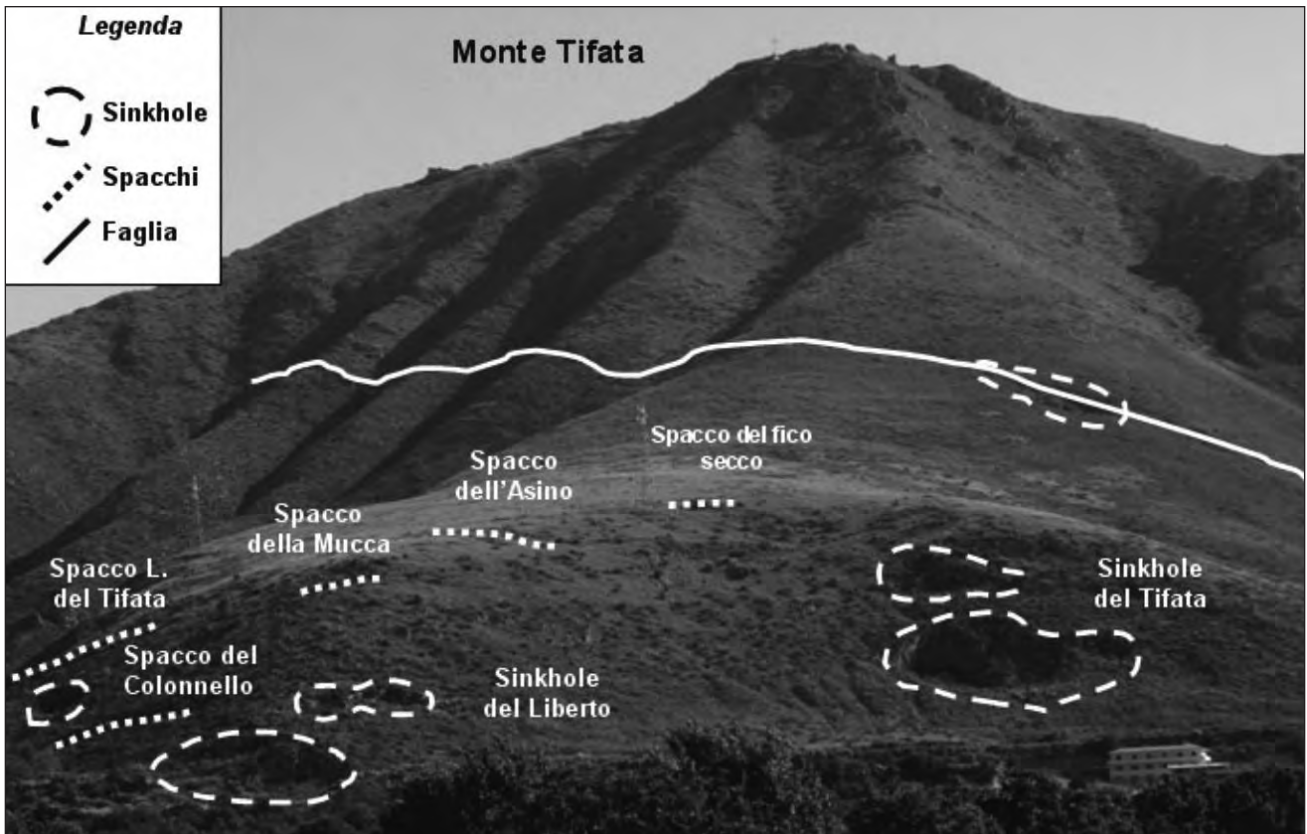


Fig. 6 - Alcuni sinkhole e fratture da trazione nella zona di Casagiove (CE) (da COZZOLINO *et alii*, 2010.)
 - Sinkholes and trenches in the Casagiove area (CE) (from COZZOLINO *et alii*, 2011).



Fig. 7 - L'interno di una cavità in vicinanza del sinkhole di Cientoportose: è ben evidente la presenza di cataclasi.

- A big cave near the Cientoportose sinkhole: it is well evident the weakness zone with coarse-fragmented crushed rock.

in cui γ è il peso dell'unità di volume della roccia (MN m^{-3}).

Ogni serie di misure consiste in 10 prove sulla superficie della discontinuità naturale.

Per ogni gruppo di 10 determinazioni sono quindi scartati i 5 valori più bassi secondo quanto indicato da BARTON & CHOUBEY (1977) e la resistenza a compressione uniassiale determinata sul valore medio dei 5 rimanenti valori di indice di rimbalzo e sulla densità della roccia (nel nostro caso il valore è pari a 26 t/m^3).

Sulla parete del sinkhole sono state effettuate misure nella fascia cataclastica ed in particolare sia sui pilastri laterali delle cavità presenti che nei settori più fratturati e carsificati (figg. 8, 9). Misure sono state effettuate nella fascia di transizione, sul liscione di faglia ivi presente e nel settore posto più a SW in cui l'ammasso risulta mediamente fratturato. Per poter ancora meglio confrontare i risultati finali sono state compiute indagini sclerometriche anche lontano dall'area del sinkhole laddove l'ammasso roccioso risultava poco fratturato.

I risultati ottenuti (fig. 10) mostrano che nella cataclasi si registrano i valori di resistenza a compressione uniassiale più bassi (valore medio circa 15 MPa) e, pertanto, l'ammasso può essere classificato a resistenza bassa (I.S.R.M., 1978). Valori equiparabili in termini di resistenza si registrano nella fascia di transizione (20 MPa) e sui pilastri delle cavità (19 MPa) mentre risultano più alti sul liscione di faglia (23 MPa) in cui l'ammasso roccioso presenta una resistenza da bassa a moderata.

Una resistenza a compressione moderata viene infine registrata nel settore mediamente fratturato (36 MPa). Essa risulta comunque più bassa rispetto a quella ricavata in un'area lontana dal sinkhole caratterizzata dalla presenza di una roccia poco fratturata (59 MPa).

3.2. - L'AREA DEI MONTI LATTARI

Una delle aree più interessate da fenomeni di sinkhole in Campania è quella della Penisola Sorrentina ed, in particolare, il versante settentrionale nell'area compresa tra Gragnano, Castellammare e Vico Equense (fig. 11). Qui i sinkhole si aprono in vicinanza di importanti centri abitati e di infrastrutture stradali e ferroviarie (BUDETTA *et alii*, 1996; SANTO & TUCCIMEI, 1997; COZZOLINO *et alii*, 2007).

Un sinkhole molto studiato è quello della Jala che ricade nel comune di Vico Equense a circa 140 m s.l.m. (fig. 12). Questa depressione si estende su un'areale di circa 2 ettari di un versante costituito da rocce calcaree e calcareo-dolomitiche di età mesozoica. Si tratta di uno sprofondamento che ha coinvolto più di 500.000 m^3 di roccia.

A monte della dolina, è presente lo "Spacco della Jala" (fig. 12), una profonda frattura con uno sviluppo complessivo di circa 800 m ed una larghezza media di 5 m, con orientazione N-S. Questa frattura e le pareti della dolina si impostano lungo delle linee tettoniche orientate E-W e N-S.

Rilievi speleologici effettuati nello Spacco della Jala hanno permesso di accertare che la frattura di trazione si approfondisce fino a circa 90 metri di profondità dal p.c. e di rilevare al suo interno alcune stalagmiti tranciate a seguito della deformazione del versante (BUDETTA *et alii*, 1996). Su questi speleotemi sono state effettuate datazioni radiometriche col metodo Th/U (SANTO & TUCCIMEI, 1997) che fissano la fine della fase di accrescimento a circa 300 anni fa. La rottura delle stalagmiti è avvenuta molto probabilmente durante un forte terremoto che ha colpito la penisola nel XV secolo. L'età individuata sembrerebbe inoltre in accordo con la dislocazione correlata allo spacco ed osservata in superficie che interessa alcuni muri a secco (*macere*) la cui edificazione è fatta risalire ad epoca tardo medievale.

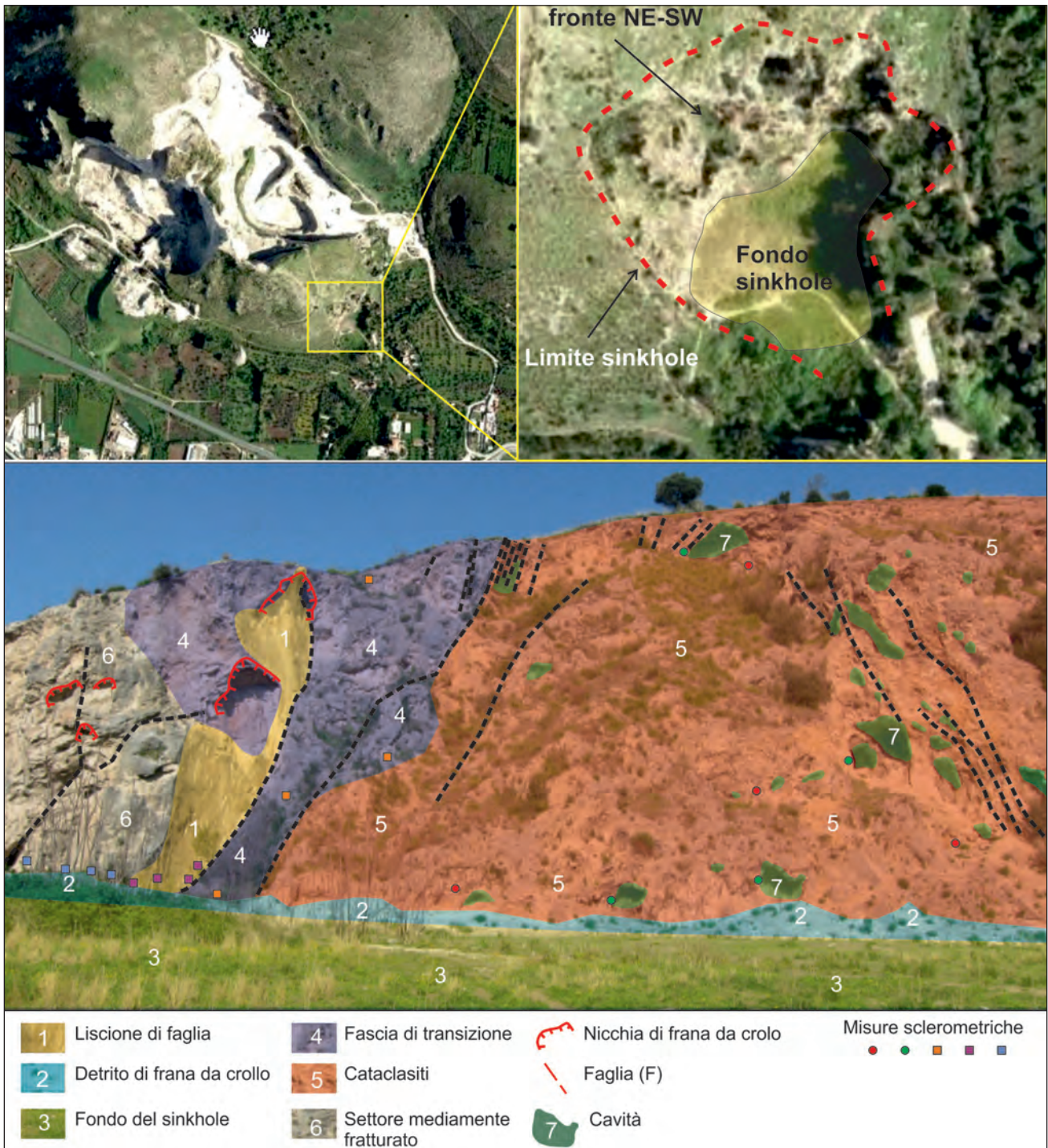


Fig. 8 - Il sinkhole di Cientopertose in pianta su ortofoto e carta geologico-strutturale della parete con direzione NE-SW.
 - Location of the Cientopertose sinkhole on a orthophoto map and geostructural map of the cliff showing a NE-SW trend.

Più a nord, nell'area di Pozzano, sul versante settentrionale di Monte Faito ed in prossimità della strada statale sorrentina, si riscontrano altri due sinkhole (fig. 11). Il più grande si apre in prossimità della costa, a poche decine di metri sul livello del mare, presenta un diametro di circa 150 m per una profon-

dità di 140 m e ha coinvolto volumi di roccia pari a circa 600.000 m³. A monte dei due sinkhole è presente anche in questo caso una profonda frattura di trazione denominata "Spacco di Pozzano" che raggiunge una larghezza di circa 5 m con uno sviluppo lineare complessivo di circa 215 m (fig. 13A).



Fig. 9 - Misure sclerometriche compiute nella cataclasite (a), sui calcari fratturati in prossimità di una cavità presente nella fascia cataclastica (b) e sul liscione di faglia (c).

- Schmidt hammer tests on the weakness zone (a); in close proximity to cave area in the limestone weakness zone (b) and on the fault scarp (c).

L'orientazione di questa frattura è parallela alle pareti dei sinkhole e con molta probabilità si è aperta successivamente agli sprofondamenti. All'interno dello Spacco, sono state condotte ricerche speleologiche in alcune diramazioni sotterranee (COZZOLINO *et alii*, 2007) e sono stati esplorati alcuni ambienti ipogei intercettati durante lo scavo di una galleria stradale (fig. 13 B).

Infine è da segnalare per quest'area la presenza lungo il perimetro costiero di numerose sorgenti mineralizzate tra le quali la più importante è quella dello Scrajo. In corrispondenza delle sorgenti spesso sono presenti cavità carsiche interessate da crolli di grandi dimensioni (fig. 14).

3.2.1. - I sinkhole di Gragnano, Castellammare e Vico Equense

In alcuni dei sinkhole della Penisola Sorrentina sono state compiute indagini geologico-strutturali i cui risultati sembrano confermare la presenza di una fascia intensamente fratturata e cataclasizzata.

Nella dolina della Jala, infatti, è stato eseguito un sondaggio a carotaggio continuo durante la fase di progettazione di una galleria stradale (fig. 15). Il sondaggio "S7" mostra per l'intera profondità (circa 35 m) la costante presenza di materiale detritico eterometrico che costituisce il riempimento da crollo del sinkhole. Più interessanti sono i dati di altri sondaggi effettuati in vicinanza ai sinkhole che evidenziano la presenza di calcari fortemente fratturati e carsificati con valori di RQD molto bassi (DEL PRETE *et alii*, 2010). Le carote estratte infatti evidenziano la presenza di calcari vacuolari con la presenza di numerose microcavità carsiche che di fatto riducono notevolmente le caratteristiche meccaniche dell'ammasso.

Le analisi geostrutturali effettuate sulle pareti interne dei sinkhole secondo le usuali metodologie di rilievo proposte dal I.S.R.M. (1978) hanno permesso di caratterizzare gli ammassi rocciosi secondo la classificazione empirica denominata *Rock Mass Rating* (BIENIAWSKI, 1979).

L'analisi è stata condotta in quei settori localiz-

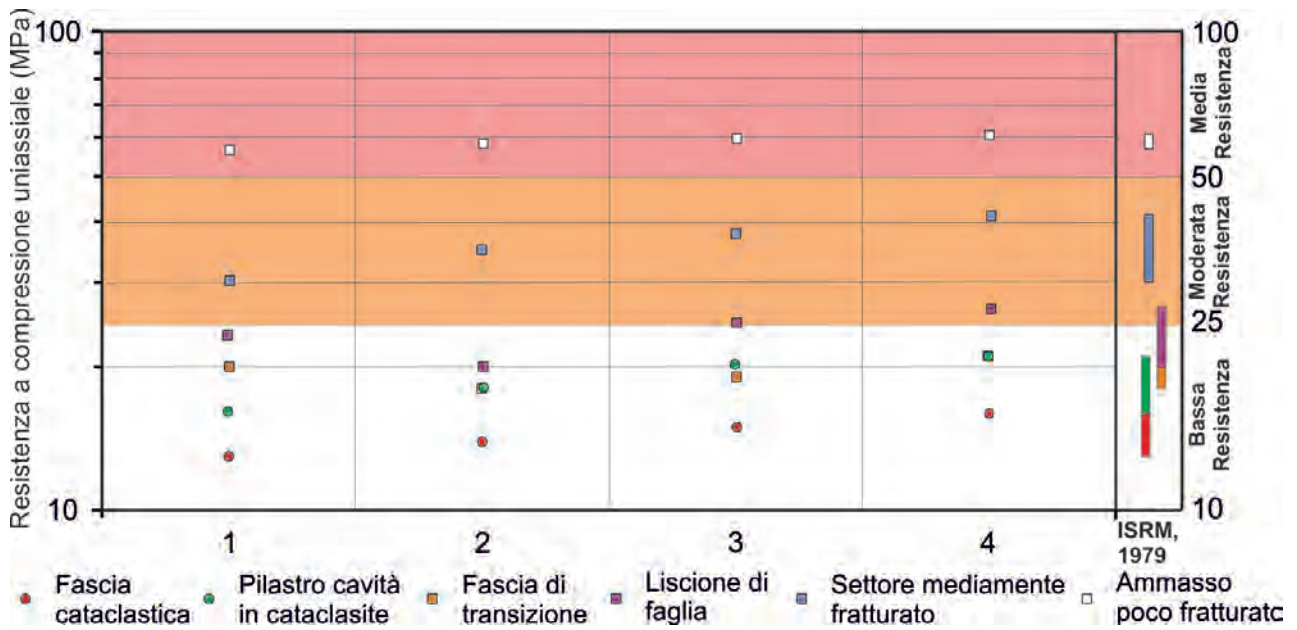


Fig. 10 - Valori di resistenza a compressione uniaxiale del fronte nord del sinkhole di Cientoptertose. - *Compressive strength values of the northern Cientoptertose rock slope.*

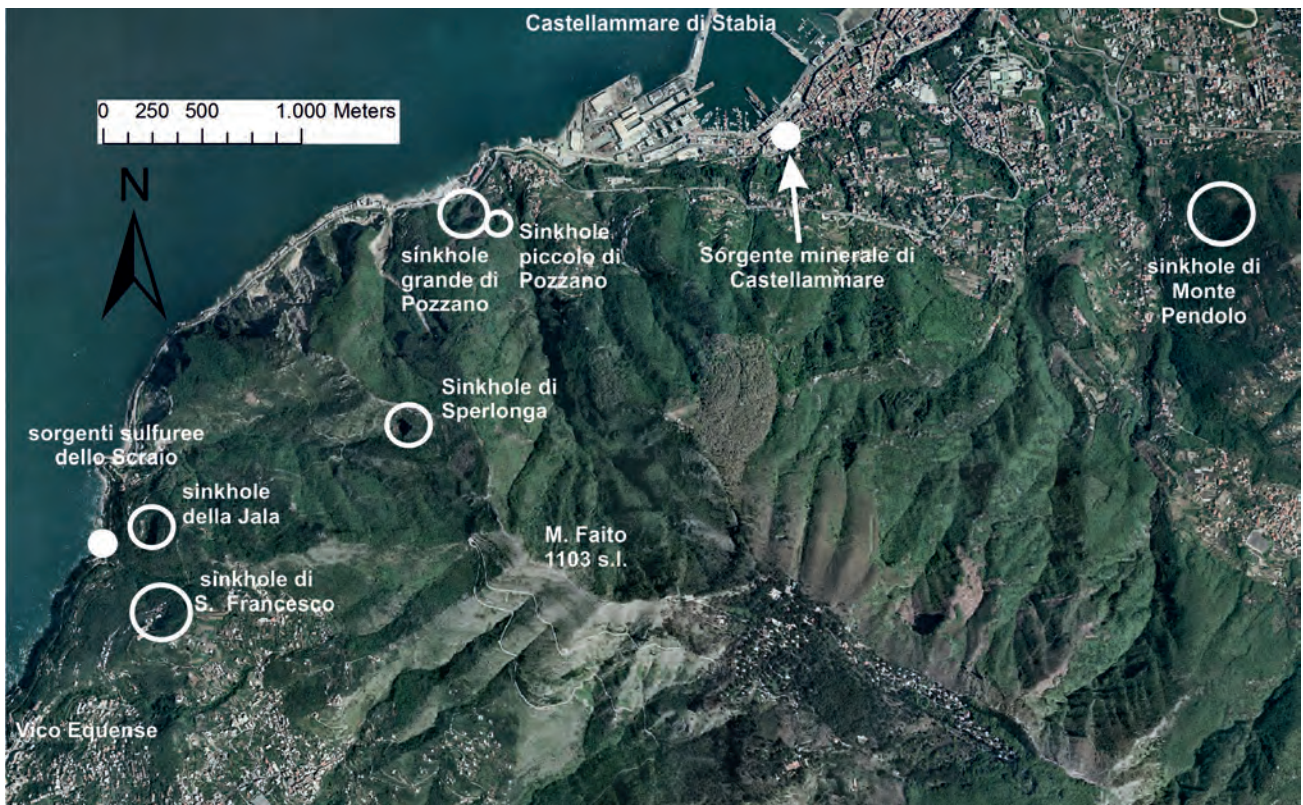


Fig. 11 - I sinkhole della Penisola sorrentina (da COZZOLINO et alii, 2007). - *Location of the Sorrento peninsula sinkholes (from COZZOLINO et alii, 2007).*

zati spesso ricadenti sui margini estremi delle pareti laddove il grado di fratturazione risultava essere medio-basso ed erano fattibili rilievi mesostrutturali lungo stendimenti di alcuni metri (max 6 m).

I risultati ottenuti su tre siti (Gragnano, Sper-

longa e S. Francesco) mostrano che la roccia su cui si sono impostati i sinkhole presenta un RMR ricadente nella IV classe (BIENIAWSKI, 1979) e, pertanto, si tratta di rocce fragili o scadenti da un punto di vista geomeccanico (fig. 16). Si fa pre-

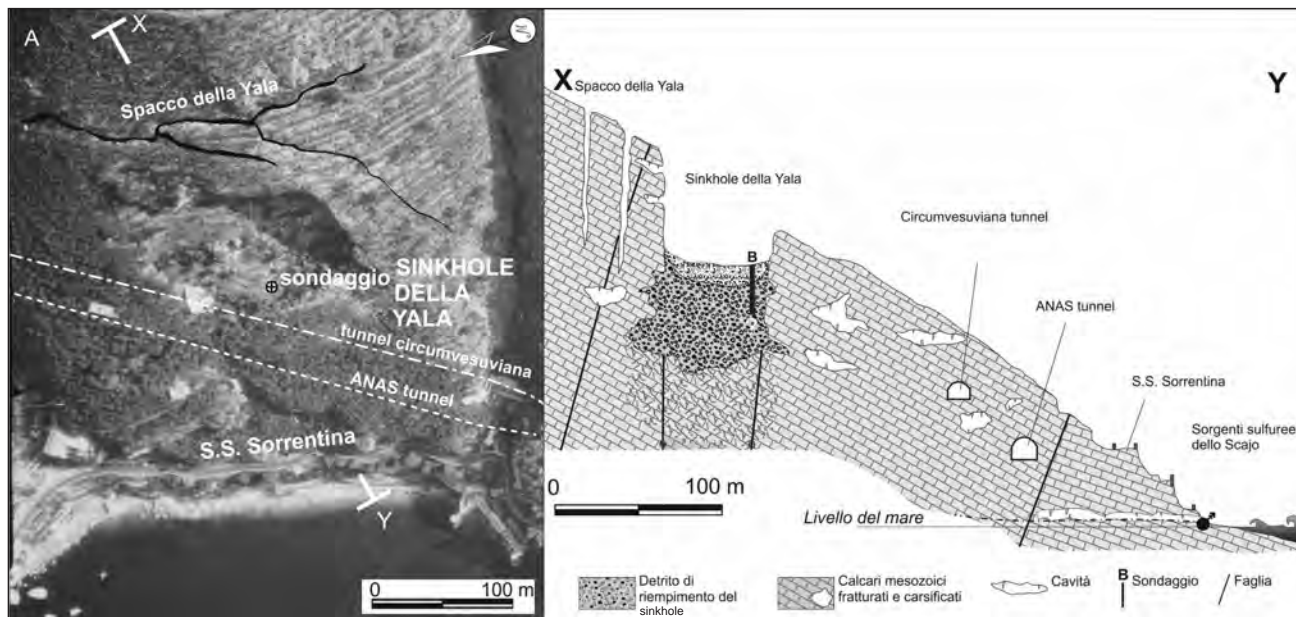


Fig. 12 - Il sinkhole della Jala: su ortofoto (a) e in sezione (b) (da DEL PRETE *et alii*, 2010).
 - Aerial photo of the Jala sinkhole (a) and cross section (b) (from DEL PRETE *et alii*, 2010).



Fig. 13 - L'interno dello Spacco di Pozzano (A) ed una delle cavità (B), (da DEL PRETE *et alii*, 2010).
 - Pozzano trench (A) and a near cave (B), (from DEL PRETE *et alii*, 2010).

sente che il dato calcolato rappresenta il valore di RMR di base e quindi non considera i possibili cinematicismi in gioco che peggiorano sensibilmente le condizioni generali dell'ammasso.

3.3. - ALTRE AREE DI INTERESSE

In molte delle aree interessate da sinkhole e riportate in tabella 1 sono in corso studi geomecca-

nici sullo stato fessurativo dell'ammasso roccioso in corrispondenza delle pareti interne degli sprofondamenti. Al contempo si stanno prelevando campioni di roccia per le analisi geomeccaniche di laboratorio e la determinazione della resistenza mediante prove a compressione uniassiale e puntuale (*Point Load test*).

Osservazioni preliminari qualitative evidenziano che in corrispondenza dei sinkhole la roccia

si presenta sempre estremamente fratturata (zone cataclastiche) per la presenza di importanti faglie.

Di seguito si riportano alcuni dei siti più significativi che saranno oggetto di studi più approfonditi.

Un'area di sicuro interesse è la valle dell'Aterno in Abruzzo. Qui sono presenti numerosi sinkhole tra cui si ricorda quello di Roio Piano la cui genesi

può essere molto probabilmente associata a terremoti storici (SANTO *et alii*, 2011). Alcuni elementi quali la “freschezza delle pareti”, il loro basso grado di alterazione e la forma molto squadrata del sinkhole con pareti verticali ben delineate fanno propendere per una genesi in epoca recente (fig. 17).

Nella media valle del F. Sele nei territori comunali

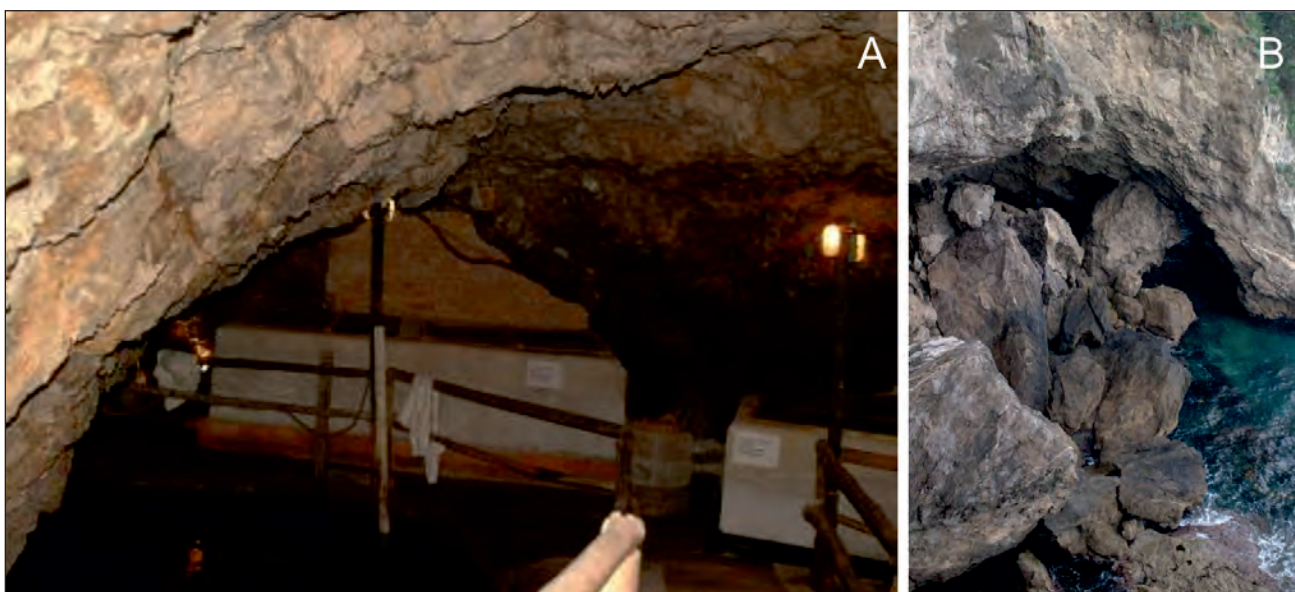


Fig. 14 - La grotta alla sorgente dello Scrajo (A) e crolli nei calcari fratturati e carsificati nei pressi della sorgente sul livello del mare (B).
 - The cave of the Scrajo spring (A) and rock falls of the fractured and karstified limestones in proximity of the spring at sea level (B).

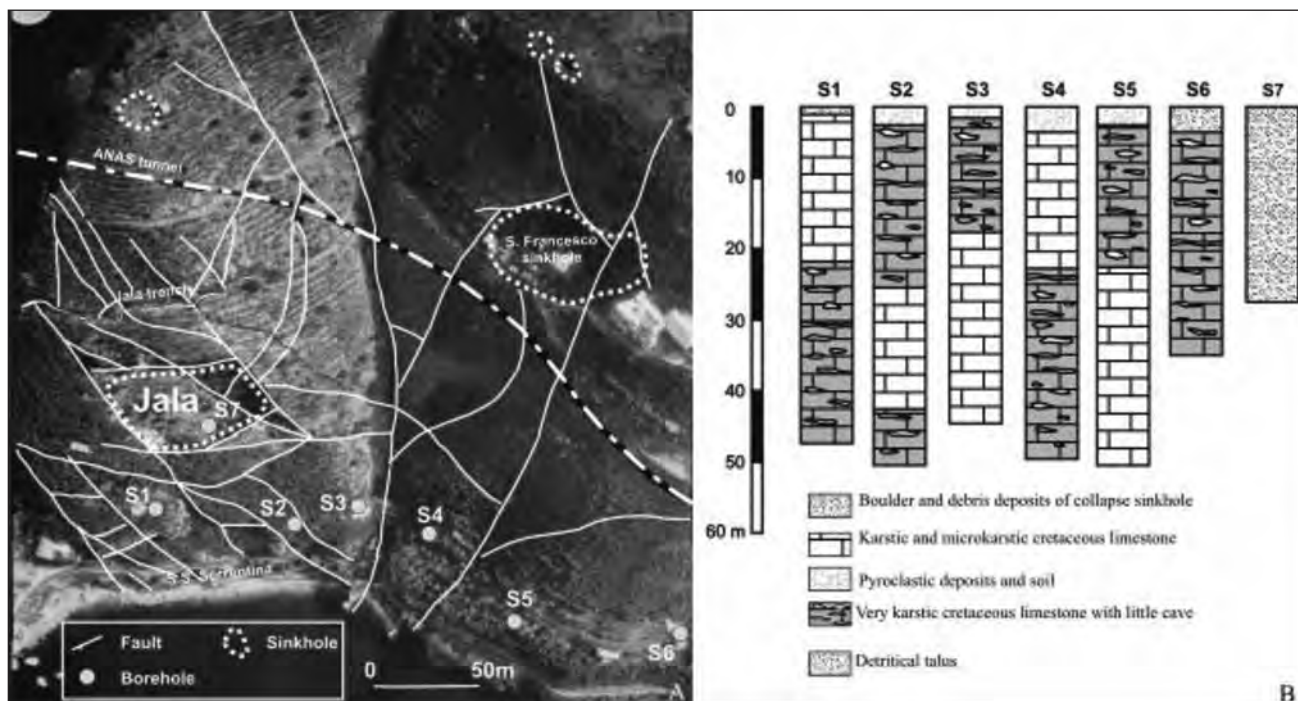


Fig. 15 - I sinkhole di Vico Equense (Jala e San Francesco) (A) e le colonne stratigrafiche ricostruite su alcuni sondaggi effettuati nell'area (B), (da DEL PRETE *et alii*, 2007).

- Jala and San Francesco sinkholes (A) and the stratigraphic columns of the boreholes (B), (from DEL PRETE *et alii*, 2007).

di Contursi, Buccino, Palomonte e Colliano si aprono almeno 20 sinkhole, alcuni dei quali alla base del versante meridionale di M. Marzano ed altri sul piccolo rilievo calcareo di M. Pruno (fig. 18 A). I sinkhole si allineano parallelamente a faglie con direzione appenninica ed Est-Ovest per M. Marzano ed in direzione antiappenninica per M. Pruno. Alcuni di essi si aprono nella fascia pedemontana nel settore medio-apicale di conoidi alluvionali mentre altri interessano i versanti calcarei intensamente fratturati.

In particolare, il sinkhole di Pianelle (fig. 18B) creatosi durante una notte del maggio 1981 (BUDETTA *et alii*, 1996) 6 mesi dopo il terremoto dell'Irpinia (23 novembre 1980, $M=6,9$) può essere considerato un effetto secondario di tale evento. Rilievi diretti compiuti all'interno del sinkhole mettono in evidenza un ammasso roccioso molto fratturato con presenza di numerosi piani di taglio e la presenza, in superficie di detriti che colmavano una depressione precedente allo sprofondamento (fig. 18 C).

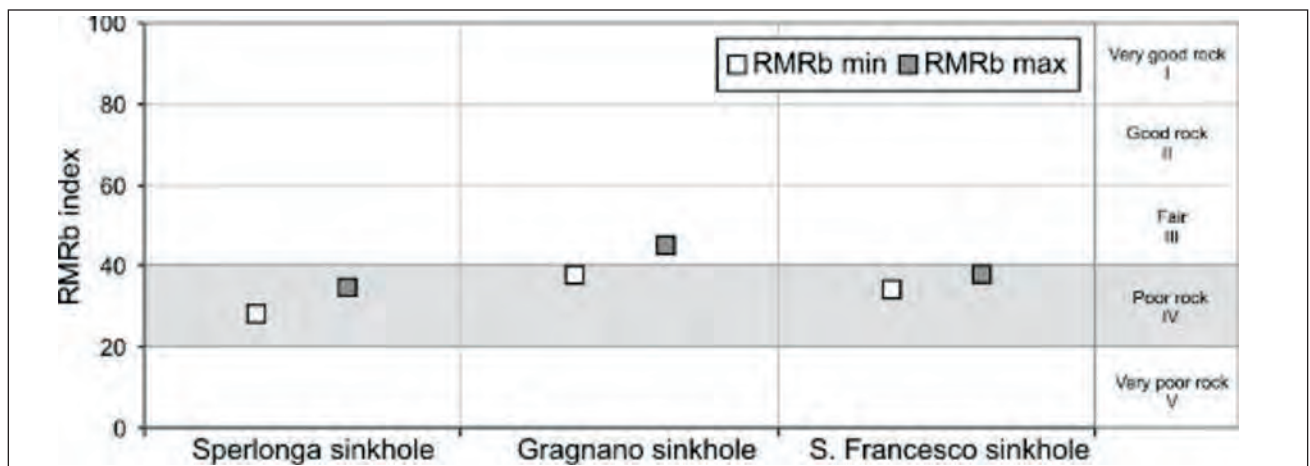


Fig. 16 - Classificazione geomeccanica degli ammassi rocciosi presenti presso alcuni sinkhole della Penisola Sorrentina.
- *Rock mass classification of three sinkholes in the Sorrento peninsula.*



Fig. 17 - Il sinkhole di Roio Piano nella valle dell'Aterno; le frecce indicano altri sinkhole più antichi.
- *Location of the Roio Piano sinkhole in the Aterno valley; white arrows indicate older sinkholes.*

Situazioni analoghe con ammassi rocciosi molto fratturati e cataclastici si ritrovano nei sinkhole delle Comole di Castel Morrone (fig. 19 C) e nella zona di Cancellò. Quest'ultimo si colloca su un versante del bordo nord orientale della piana campana a monte di una cava in calcari (fig. 19 D).

In Campania esistono infine molti casi in cui è stata notata la vicinanza di zone estremamente in-

teressate da fenomeni di sprofondamenti ad epicentri di terremoti storici di grande rilievo. Un esempio è quello dell'area di Telesse Terme il cui principale sinkhole è stato associato al terremoto del 9 settembre 1349 (ROSSI, 1857; RICCARDI, 1927) mentre quelli di San Salvatore Telesino (Montepugliano) hanno subito sicuramente una riattivazione successivamente all'evento sismico del 26 luglio 1805 (PORFIDO *et alii*, 2002). Anche in

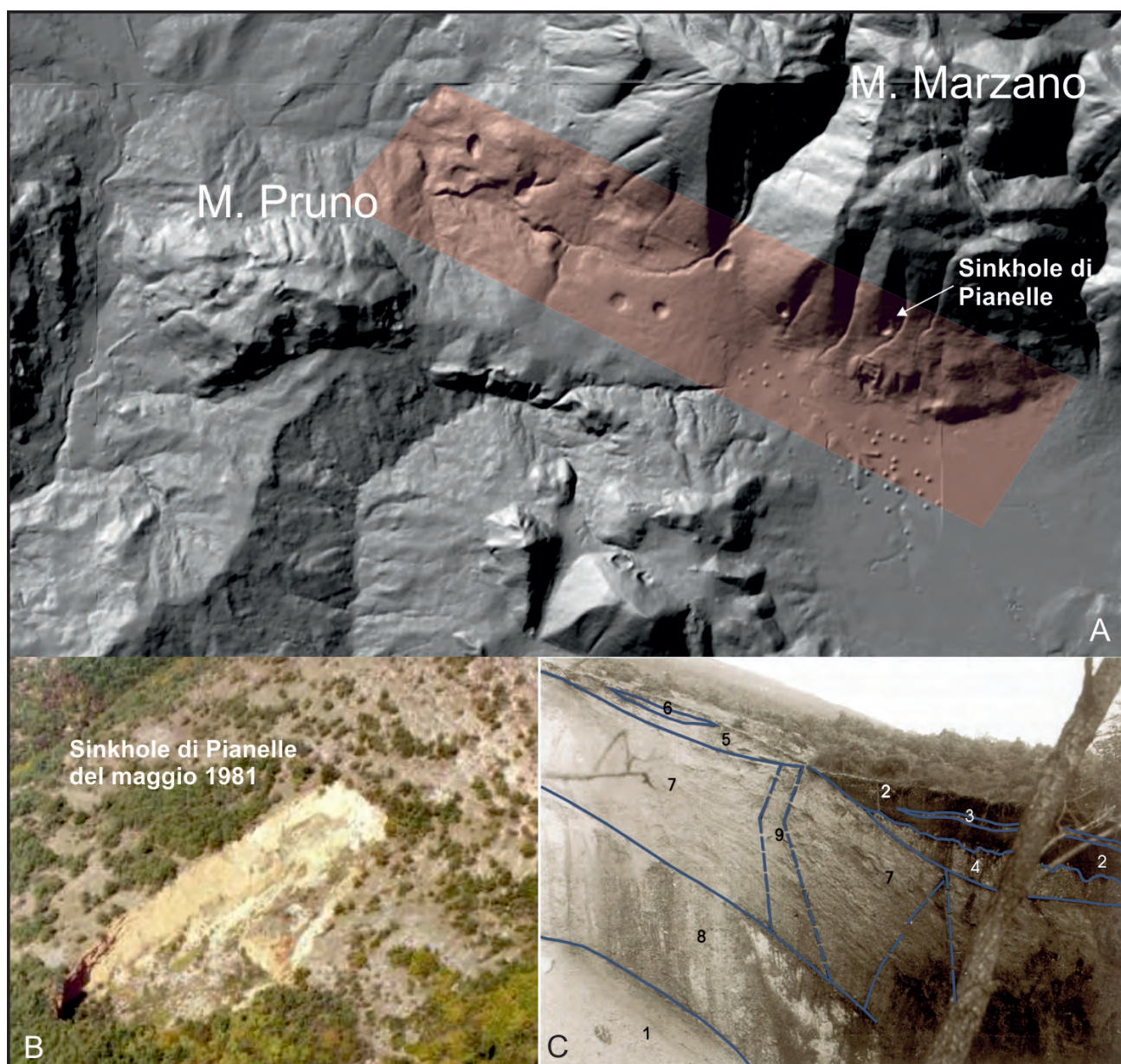


Fig. 18 - I sinkhole presenti nell'area di Buccino-Pianelle sul versante meridionale di M. Marzano: la fascia colorata indica la fascia cataclastica della faglia bordiera (A). Foto da elicottero del sinkhole di Pianelle (B) e ricostruzione geologica dell'interno del sinkhole con indicazione: dei settori rocciosi più fratturati (settori 1-8-7); dei piani di taglio (9) e del detrito che colmava una depressione precedente allo sprofondamento 4-5-6, (da BUDETTA *et alii*, 1996 mod.).

- Sinkholes located in the Buccino-Pianelle area on southern slope of Marzano Mt.: the highlighted area indicates the damage zone of the main fault (A). Aerial photo of the Pianelle sinkhole (B) and geological reconstruction inside the sinkhole: very fractured rocks (1-8-7); fault plains (9); filling debris of an ancient landform sunken (4-5-6), (from BUDETTA *et alii*, 1996 mod.).

quest'area sopralluoghi compiuti all'interno dei sinkhole mostrano pareti con rocce talmente fratturate da apparire come un ammasso detritico incoerente ed eterometrico (fig. 20).

4. - CONSIDERZIONI CONCLUSIVE

In questo lavoro si riportano i dati preliminari di uno studio *in progress* che prevede la caratterizzazione fisica dell'ammasso roccioso in cui si aprono sinkhole in diversi siti dell'Appennino centro-meridionale.

Allo stato attuale delle conoscenze, gli studi hanno permesso di giungere ad alcune conclusioni legate essenzialmente alla loro localizzazione: con-

temporanea presenza di calcari cretacici o giurassici; allineamento secondo importanti faglie regionali; corrispondenza con aree con numerose emergenze di falde mineralizzate sovente sulfuree e con aree sismicamente attive (SANTO *et alii*, 2011).

Al momento rimane ancora poco chiara la loro genesi ed in particolare come possono formarsi i vuoti o i fenomeni di costipamento in profondità tali da giustificare lo sprofondamento improvviso di volumi di materiale che possono raggiungere le diverse centinaia di migliaia di metri cubi. Al riguardo, in letteratura scientifica si invoca di norma la presenza di grandi cavità carsiche profonde che cedendo provocano la formazione dei sinkhole con meccanismi che ricordano (a scala decisamente inferiore) quelli degli sprofondamenti legati



Fig. 19 - Calcari intensamente fratturati all'interno dei sinkhole di M. Pruno a Contursi (A), di Buccino in località Valle di Raio (B), di Castel Morrone (C) e di Canello (D).

- Very fractured limestones in the M. Pruno (A), Buccino (B), Castel Morrone (C) and Canello sinkhole (D).

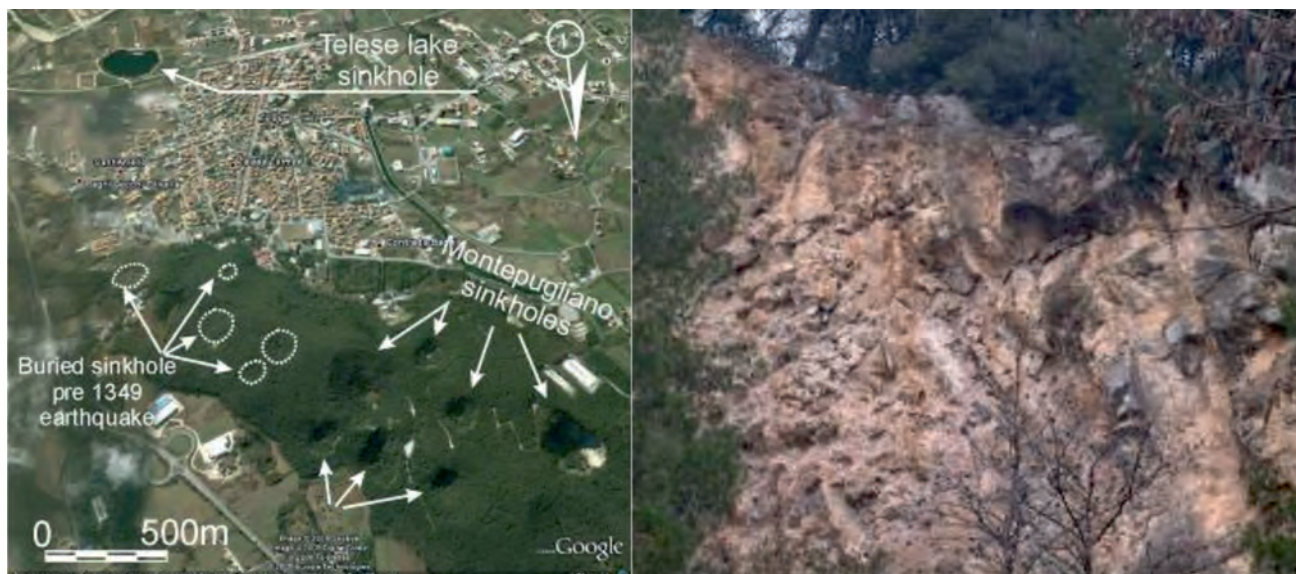


Fig. 20 - I numerosi sinkhole di Montepugliano a Telese (Monti di Caserta) ed un particolare della parete interna di uno di loro.
 - The numerous sinkholes of the Montepugliano hill (Telese) and a detail of the slope of one of them (on the right).

a cavità artificiali. Le ricerche compiute finora sembrerebbero non confermare quest'ultima ipotesi.

In primo luogo si è notato che laddove esistono grandi sistemi carsici con massicci rocciosi molto suscettibili a carsismo (Cilento carbonatico e Monti Picentini della Campania) non si ha la contemporanea presenza di sinkhole. Viceversa dove esplorazioni speleologiche non evidenziano presenza di sistemi carsici, si nota una forte concentrazione di sinkhole.

I dati raccolti farebbero propendere maggiormente per fenomeni di ipercarsificazione o carsismo diffuso legati alla circolazione di acque particolarmente aggressive (presenza di H_2S) che portano alla formazione di microcavità e ad un forte decadimento delle proprietà fisico-meccaniche generali dell'ammasso roccioso come per esempio in Penisola sorrentina e a San Prisco e San Clemente nel casertano. Qui infatti i calcari alla scala del versante e nell'ambito di fasce molto fratturate presentano punti di notevole debolezza in cui si sono impostati gli sprofondamenti. Le fasce in questione non recano traccia di una evidente attività carsica superficiale mentre risulta verificato costantemente un forte grado di tettonizzazione dell'ammasso tanto da farlo apparire come una vera e propria cataclaste.

I risultati di cui prima non chiariscono del tutto

il meccanismo di formazione dei sinkhole che rimane al momento poco chiaro e tutto da dimostrare sperimentalmente. Essi però possono aiutare ad individuare le aree maggiormente suscettibili a tali fenomenologie dal momento che si concentrano in settori geologicamente, geostretturalmente e idrogeologicamente ben definiti.

In tale ottica, la loro presenza e distribuzione non potrà non essere tenuta in considerazione per futuri studi di pianificazione territoriale, sia nel caso di progettazione di grandi opere di ingegneria come ad esempio gallerie, sia per il possibile verificarsi di fenomeni improvvisi e/o di amplificazione sismica locale durante forti terremoti.

BIBLIOGRAFIA

- BARTON N. & CHOUBEY V. (1977) - *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics 1/2:1-54. Vienna: Springer.
- BECK B.F. (Ed.) (1984) - *Sinkholes, their geology, engineering and environmental impact*. Balkema: pp. 429, Rotterdam and Boston.
- BERTI G., CANUTI P., CASAGLI N., PRANZINO G. & MICHELI L. (2002) - *Risultati preliminari delle indagini sullo sprofondamento in loc. Bottegone (Grosseto)*. In: Atti del Convegno "Le voragini catastrofiche, un nuovo problema per la Toscana", 31 marzo 2000, Regione Toscana, Provincia e Comune di Grosseto: 242-256.
- BIENIAWSKI Z.T. (1979) - *The Geomechanics Classification in Rock Engineering applications*. Proc. 4th Int. Congr. on Rock Me-

- chanics, **2**: 51-58.
- BUDETTA P., NICOTERA P. & SANTO A. (1996) - *Controlli e monitoraggio di fenomeni deformativi indotti da carsismo in versanti carbonatici dell'Appennino campano*. Atti del Convegno Internazionale: "La prevenzione delle catastrofi idrogeologiche: il contributo della Ricerca scientifica. C.N.R., Alba 5-7 Novembre 1996: 383-395.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G. & NISIO S. (2008) - *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. *Natural Hazards*, **45**: 145-172.
- CORNIELLO A. & DE RISO R. (1986) - *Idrogeologia e idrochimica delle sorgenti dell'Agro Telesino*. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, **21**: 53-84.
- CORNIELLO A. & SANTO A. (1995) - *I dissesti della Basilica Benedettina (XI secolo) di S.A. in Formis (Capua) ed il complesso assetto geologico dell'area*. *Geol. Appl. e Idrog.* **30**: 125-137, Bari.
- COZZOLINO L., MINIERI G., VILLANO D., VILLANO R. & SANTO A. (2011) - *Prime considerazioni sui sinkhole carsici del versante meridionale del Monte Tifata*. In: Atti II Convegno Regionale di Speleologia. Caselle In Pittari, 3-6 giugno 2010: p. 187-194.
- COZZOLINO L., PIANESE N., SANTANGELO N., DI CRESCENZO G. & SANTO A. (2007) - *Sinkhole di origine carsica nell'area dei Monti Lattari*. Atti I Convegno Regionale di Speleologia: "Campania Speleologica", 1-3 giugno 2007, Oliveto Citra (SA), Federazione Speleologica Campana (Ed.): 85-101.
- DEL PRETE S., DE RISO R. & SANTO A. (2004) - *Primo contributo sui sinkhole di origine naturale in Campania*. Atti Conv.: "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", 20-21 maggio 2004, APAT: pp. 361-376, Roma.
- DEL PRETE S., DI CRESCENZO G., SANTANGELO N. & SANTO A. (2010a) - *Karst sinkholes in Campania (southern Italy): geostructural analysis, predisposing factors and genetic hypothesis*. EGU general Assembly 2008, Zeitschrift für Geomorphologie N.T., **54** (2): 259-284, Berlin Stuttgart.
- DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A. (2008a) - *Nuove ipotesi sulla formazione dei piping sinkhole in aree alluvionali: il caso della Piana di Forino (Avellino, Campania)*. *Il Quaternario*, **21**: 395-408.
- DEL PRETE S., GUARINO P.M., NISIO S. & SANTO A. (2008b) - *I sinkhole in Campania*. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, **85**: 149-211.
- DEL PRETE S., IOVINE G., PARISE M. & SANTO A. (2010b) - *Type and distribution of sinkholes in the plain areas of Southern Italy*. In stampa su: *Geodinamica Acta*, special issue EGU2009 - Vienna, Karst Systems & Karst Hazards.
- FAIRBRIDGE J.R. (1968) - *The Encyclopedia of Geomorphology*. (Ed.) Reinhold, New York, 1968, 1295 pp.
- HOEK E., MARINOS P. & BENISSI M. (1998) - *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses - The cases of the Athens Scist Formation*. *Bull. Eng. Geol. Env.*, **57** (2): 151-160.
- I.S.R.M. (INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS) (1978) - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. *Int. J. for Rock Mech. And Min.*
- MAFFEI A., MARTINO S. & PRESTININZI A. (2005) - *From the geological to the numerical model in the analysis of gravity-induced slope deformations: an example from the central Apennines (Italy)*. *Eng. Geol.*, **78**: 215-236.
- MARINOS P. & HOEK E. (2001) - *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*. *Bull. Eng. Geol. Env.* **60**:82-92
- MARTINO S. & PRESTININZI A. (2004) - *Interazioni tra carsismo e deformazioni gravitative profonde di versante nella genesi di sinkholes*. Atti Conv.: "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", 20-21 maggio 2004, pp. 519-530, Roma.
- MONROE W.H. (1970) - *A glossary of Karst terminology*. *U.S. Geol. Surv. Water Supp.*, 1899: 1-26.
- NISIO S. (Eds.) 2008 - *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, ISPRA, **85**, pp. 482, Roma.
- PALMSTRÖM A. (1995) - *RMi - A rock mass characterization system for rock engineering purposes*. Ph D. Thesis, Università di Oslo, Norvegia, 430 pp.
- PARISE M. & FLOREA L.J. (2007) - *I sinkholes nella letteratura scientifica internazionale: una breve rassegna, con particolare riferimento agli Stati Uniti d'America*. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, **85** (2008), pp. 427-450, figg. 15, tab. 1.
- PORFIDO S., ESPOSITO E., VITTORI E., TRANFAGLIA G., MICHETTI A. M., BLUMETTI M., FERRELLI L., GUERRIERI L. & SERVA L. (2002) - *Areal distribution of round effects induced by strong earthquakes in southern Apennines (Italy)*. *Survey Geophysics*, **23**, pp. 529-562, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- RICCARDI L. (1927) - *Telesia. Ricordi e Speranze*. Tip. Nazzeno Borrelli, Benevento 1927.
- ROSSI D. (1857) - *Sulle acque minerali di Telesse e sullo Stabilimento dei Bagni quivi costruito*. *Annali Civili del Regno delle due Sicilie*, Napoli, **61** (121), sett/ott 1857.
- RUSSO N., DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A. (Eds.) (2005) - *Grotte e Speleologia della Campania*. Federazione Speleologica Campana, Sellino (Ed.), 624 pp., 1 DVD-Rom, 9 tav. f.t.
- SANTO A., ASCIONE A., DEL PRETE S., DI CRESCENZO G. & SANTANGELO N. (2011) - *Collapse sinkholes distribution in the carbonate massifs of central and southern Apennines*. *Acta Carsologica*, **40**, pp. 95-112
- SANTO A., DEL PRETE S., DI CRESCENZO G. & ROTELLA M. (2007) - *Karst processes and slope instability: some investigations in the carbonate Apennine of Campania (southern Italy)*. PARISE & GUNN (Eds.): "Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation". Geological Soc. London, Special Pub., 279, pp. 59-72.
- SANTO A. & TUCCIMEI P. (1997) - *Ricostruzione di eventi deformativi di versante tardo-quaternari ed olocenici attraverso studi geomorfologici e datazioni radiometriche Tb/U: l'esempio dell'area di Vico Equense*. *Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences*, **10** (2), pp. 477- 481.
- WALTHAM T., BELL F. & CULSHAW M. (2005) - *Sinkholes and subsidence*. Springer, 382 pp.