

Sviluppo ed evoluzione di sprofondamenti in rocce solubili: un confronto tra il carso coperto del Bacino dell'Ebro (Spagna) e la Penisola Salentina (Italia)

*Development and evolution of sinkholes in soluble rocks: a comparison between
the mantled karst of the Ebro Basin (Spain) and the Salento Peninsula (Italy)*

GIL H. (*), PEPE M. (**), SORIANO M.A. (*), PARISE M. (**),
POCOVÍ A. (*), LUZÓN A. (*), PÉREZ A. (*), BASSO A. (**)

RIASSUNTO - Sprofondamenti (*sinkholes*) di diversa tipologia e meccanismi d'innescio si verificano in tutto il mondo in rocce solubili, e rappresentano una delle peculiarità dei territori carsici. La loro analisi può essere affrontata da diversi punti di vista, a seconda dell'età del fenomeno, delle rocce coinvolte, della relazione con cavità naturali accessibili all'uomo, o con cavità antropiche, e così via. A prescindere dall'approccio, l'analisi degli sprofondamenti necessita di una dettagliata conoscenza dell'assetto geologico, che consenta di individuare le condizioni più probabilmente all'origine degli stessi. Il confronto di diverse aree di indagine può essere estremamente utile per l'individuazione dei principali fattori predisponenti e scatenanti; questi dati saranno poi utili per qualsiasi altro lavoro finalizzato alla definizione della suscettibilità e del rischio da sprofondamenti. Con questo scopo, sono state prese in considerazione due aree: la piana alluvionale del Fiume Ebro in Spagna, e la Penisola Salentina in Puglia, in Italia meridionale. Le due aree sono interessate da una frequente occorrenza di eventi di sprofondamento, sebbene in litologie diverse: evaporiti mioceniche in Spagna, e calcareniti plio-pleistoceniche in Italia.

L'area di indagine in Spagna è ubicata nella porzione centrale del Bacino dell'Ebro, dove conglomerati alluvionali del Quaternario poggiano sulle evaporiti mioceniche (gesso e sali più solubili). La dissoluzione dei livelli del Terziario ha provocato la genesi di sprofondamenti da collasso della copertura e da suffosione. Sin dal 1970, quando estese aree carsiche sono state inglobate nell'area urbana, sono stati registrati costantemente ingenti danni, con perdite economiche

conseguenti. Una caratteristica sorprendente in quest'area è la presenza di paleosinkholes verificatisi nel Pleistocene, che indicano processi carsici attivi in un contesto naturale, senza alcuna interferenza antropica.

Il Salento è la porzione più meridionale della Puglia, il tacco dello stivale italiano, ed è un'area interamente carsica. Le calcareniti recenti, che poggiano sul substrato locale rappresentato dai calcari del Cretaceo e dai calcari marnosi del Miocene, sono interessate da molti fenomeni di sprofondamento, prevalentemente da collasso, collasso della copertura e da suffosione. Inoltre, diversi casi sono stati documentati negli ultimi anni, attribuiti ad attività estrattiva, con pesanti conseguenze in termini di perdite economiche per la società.

Partendo dalla profonda conoscenza acquisita negli ultimi decenni, riguardo l'assetto geologico e geomorfologico delle due aree di indagine, presentiamo in questo lavoro un primo confronto dell'occorrenza degli sprofondamenti, con particolare riguardo alla frequenza e distribuzione, ai caratteri morfometrici, e alle relazioni con l'ambiente antropico. Quest'ultimo aspetto è di peculiare importanza, essendo strettamente connesso alla definizione del rischio totale. Sprofondamenti antichi e attuali sono analizzati e messi a confronto, in modo tale da definire gli eventuali cambiamenti nelle dimensioni dei fenomeni osservati, possibilmente legati ai cambiamenti climatici e/o alle interferenze umane.

PAROLE CHIAVE: sprofondamenti, evaporiti, carbonati, pericolosità, carso coperto

(*) Dpto. Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spagna; hecgilgarbi@gmail.com, asuncion@unizar.es, apocovi@unizar.es, aluzon@unizar.es, anperez@unizar.es

(**) CNR-IRPI, Via Amendola 122-I, 70126 Bari, Italia; mari.pepe81@gmail.com, m.parise@ba.irpi.cnr.it, a.basso@ba.irpi.cnr.it

ABSTRACT - Sinkholes of different types and mechanisms occur worldwide in soluble rocks, and represent one of the most typical features of karst settings. Their analysis may start from several standpoints, depending on age of the sinkhole, involved rocks, relation with underground caves explorable by man, connection with voids of anthropogenic origin, and so on. Whether the approach, study of sinkholes has necessarily to begin with a detailed research about the geological setting, in order to identify the most likely conditions leading to sinkhole occurrence. Comparison of different study areas may be extremely useful for a definition of the main factors acting in both the predisposition of terrains to sinkholes, and their trigger as well; such data will be useful for any further work addressed to definition of the sinkhole susceptibility and hazard. With this aim, two areas have been here considered: the alluvial plain of the Ebro River in Spain, and the Salento peninsula of Apulia, in southern Italy. The two areas are characterized by frequent occurrence of sinkholes, even though involved rock masses are different: Miocene evaporites in Spain, and Pliocene-Pleistocene calcarenites in Italy.

The Spanish test site is located in the central Ebro Basin where Quaternary coarse detrital deposits overlie Miocene evaporites (gypsum and more soluble salts). The dissolution of Tertiary beds has caused the generation of cover collapse and suffusion sinkholes. Since 1970, wide karst areas were urbanized and important damages, with subsequent economic losses, have been constantly recorded. A striking feature in the area is the existence of palaeosinkholes generated during the Pleistocene indicating that karstification developed by environmental conditions without any human influence.

Salento is the terminal portion of Apulia, the heel of the Italian boot, and is an entirely karst land. Recent calcarenites, overlying the local bedrock represented by Cretaceous limestones and Miocene marly carbonates, are affected by a number of sinkhole phenomena, mainly covering the typology of collapse, cover collapse and suffusion sinkholes. In addition, several cases have been recorded in the last years as related to underground quarries, with heavy consequences in terms of economic losses for the society.

Starting from a deep knowledge acquired in the last decades about the geological and morphological setting of the two study areas, we present in this work a first comparison of the sinkhole occurrence, with particular regard to frequency and distribution of sinkholes, morphometric features, and relation with the anthropogenic environment. The latter topic is of particular importance, as a matter of fact, being strictly linked to definition of the total risk. Old and recent sinkholes are analyzed and compared, in order to define likely changes in size of the observed phenomena, possibly linked to climatic changes and/or human interferences.

KEY WORDS: sinkholes, evaporites, carbonates, hazard, covered karst

1. - INTRODUZIONE

In estrema sintesi, lo sviluppo della carsificazione dipende dalla presenza di rocce solubili, dalla disponibilità di acqua e da un gradiente idraulico (WHITE, 1988). Esistono poi altri fattori che influenzano l'efficacia del processo di dissoluzione; tra questi, lo spessore della roccia carsificabile, l'esistenza di intercalazioni di materiale non solubile, la presenza e distribuzione di fratture, la composizione chimica dell'acqua sotterranea, la profondità o variazione del livello freatico (JASSIM *et alii*, 1997; YAORU & COOPER, 1997; PAUKŠTYS & COOPER, 1999; COOPER, 2002; SALVATI & SASOWSKY, 2002; DELLE ROSE *et alii*, 2004; CLOSSON *et alii*, 2007; FORD & WILLIAMS, 2007; YILMAZ, 2007; MANCINI *et alii*, 2009). Quando le rocce solubili sono ricoperte da altre rocce o da una copertura detritica non consolidata è necessario inoltre considerare le caratteristiche di tali materiali (spessore della copertura, comportamento geomeccanico della stessa, composizione, contenuto in acqua, ecc.), come indicato, ad esempio, dai lavori di LAMONT-BLACK *et alii* (2002), ZHOU & BECK (2008, 2011) e PARISE & LOLLINO (2011). Infine, nel processo di carsificazione bisogna anche considerare la azione antropica che può modificare le condizioni ambientali naturali (CLOSSON & ABOU KARAKI, 2009; SORIANO *et alii*, 2012). L'importanza di tutti questi fattori varia in funzione delle zone considerate.

Ai fini della valutazione della suscettibilità a eventi di sinkhole, risulta pertanto importante esaminare contesti diversificati, nell'ambito dei quali si siano sviluppati in passato e/o avvengano attualmente sprofondamenti. Ciò in particolare riferimento, ad esempio, ai caratteri geologico-strutturali che possono fortemente influenzare lo sviluppo di sinkhole.

Nel tentativo di approfondire tale tematica, il presente lavoro prende in esame due zone caratterizzate da presenza di sinkhole, cercando di evidenziare, a partire da studi geologici, morfologici e strutturali, quali sono i principali fattori condizionanti la formazione e l'evoluzione dei fenomeni in esame. Le due aree di studio, rispettivamente ubicate in Spagna (Bacino dell'Ebro, nei dintorni di Saragozza) e in Italia (zona di Barbarano del

Capo, Salento meridionale, Puglia), pur differendo per estensione areale e litologie coinvolte, sono senza dubbio di interesse per la disamina degli elementi su richiamati. Si tratta di settori a carso coperto, con la differenza che nell'area di studio spagnola le evaporiti sono presenti al di sotto di una copertura alluvionale, mentre in quella italiana il substrato calcareo del Cretaceo è ricoperto da depositi più recenti, anch'essi di natura carbonatica e, come tali, soggetti a fenomeni di carsismo e/o paracarsismo (ANELLI, 1963, 1964).

2. - L'AREA DI STUDIO IN SPAGNA: IL BACINO DELL'EBRO

2.1. - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E GEOLOGICO

Nei dintorni della città di Saragozza, nel settore centrale della Valle dell'Ebro, si è prodotta carsificazione per tutto il Quaternario, a causa della dissoluzione dei materiali evaporitici del Neogene presenti al di sotto della copertura alluvionale quaternaria depositata dal fiume Ebro e dai suoi affluenti. In tale copertura, le paleodoline e i condotti carsici risultano abbondanti (fig. 1 A, B e C; GUTIÉRREZ *et alii*, 2008; LUZÓN *et alii*, 2008, 2011; SIMÓN *et alii*, 2008; SORIANO *et alii*, 2010, 2012). In realtà, la dissoluzione genera numerose doline alluvionali, già oggetto di studio da diversi autori (VAN ZUIDAM, 1976; GUTIÉRREZ *et alii*, 1985; SORIANO, 1992; SORIANO & SIMÓN, 1995; GUTIÉRREZ *et alii*, 2005). Il loro sviluppo produce problemi e perdite economiche in zone agricole e urbane, stimate in vari milioni di euro per anno (GUERRERO *et alii*, 2004; SIMÓN *et alii*, 2008; GALVE *et alii*, 2009). Questi problemi aumentarono a partire dal 1970, quando si produsse la espansione urbana e delle aree industriali intorno alla città di Saragozza (fig. 1 D, E e F).

Vari autori hanno analizzato i fattori che intervengono nella genesi di doline in questa zona (spessore della copertura alluvionale, percentuale di lutiti della copertura alluvionale, posizione del contatto alluvioni-substrato, variazioni piezometriche, gradiente piezometrico, uso del suolo, geomorfologia, concentrazione di solfati nell'acqua,

ecc.) dando luogo a differenti modelli di suscettibilità di formazione di doline così come alla classificazione di zone di rischio (SIMÓN *et alii*, 1991, 1998; SORIANO & SIMÓN, 1995; GUTIÉRREZ *et alii*, 2007; LAMELAS *et alii*, 2008; GALVE *et alii*, 2009). Alcuni tra questi autori segnalano che l'importanza di ciascun fattore è differente a seconda della scala (regionale o di dettaglio) considerata. Anche la fratturazione del substrato terziario è considerata condizionante nello sviluppo delle doline nella zona (SORIANO, 1992; GUTIÉRREZ *et alii*, 2007). Infine, è necessario considerare l'azione antropica specialmente riguardo alla attività agricola, la quale incrementa l'entrata di acqua nell'acquifero in entità di almeno 20 volte superiore a quella apportata dalla ricarica naturale per precipitazione (SORIANO *et alii*, 2012).

La zona di studio è ubicata nei dintorni di Saragozza, nel settore centrale del Bacino dell'Ebro, nella Penisola Iberica nord-orientale. Il clima è di tipo continentale semiarido con temperatura media annua di 15°C e precipitazioni di circa 350 mm/anno. Le escursioni termiche sono elevate, con massimi prossimi ai 40°C e minime di -10°C. Le piogge sono concentrate in primavera e autunno.

Geologicamente la valle dell'Ebro è una zona di avampaese in relazione alla evoluzione dell'orogene pirenaico, di cui costituisce il margine settentrionale (fig. 2). La sua forma è triangolare, limitata dalla Cordillera Costiera Catalana ad est e da quella Iberica a sud. Mentre nel corso di gran parte del Terziario questo bacino fu connesso all'Oceano Atlantico, a partire dall'Eocene superiore si configura come un solco endoreico nel quale si svilupparono sistemi alluvionali provenienti dai margini, con la deposizione di materiali detritici, che giunsero in contatto nel centro del bacino con sistemi lacustri carbonatici o evaporitici (MUÑOZ *et alii*, 2002; PARDO *et alii*, 2004). A partire dal Miocene medio-superiore (GARCÍA-CASTELLANOS *et alii*, 2003), il bacino divenne esoreico e si collegò al mare Mediterraneo verso sud-est. A partire da questo momento si va a configurare progressivamente la rete di drenaggio attuale.

In parziale copertura al di sopra di questi materiali terziari si rinvencono depositi quaternari cos-

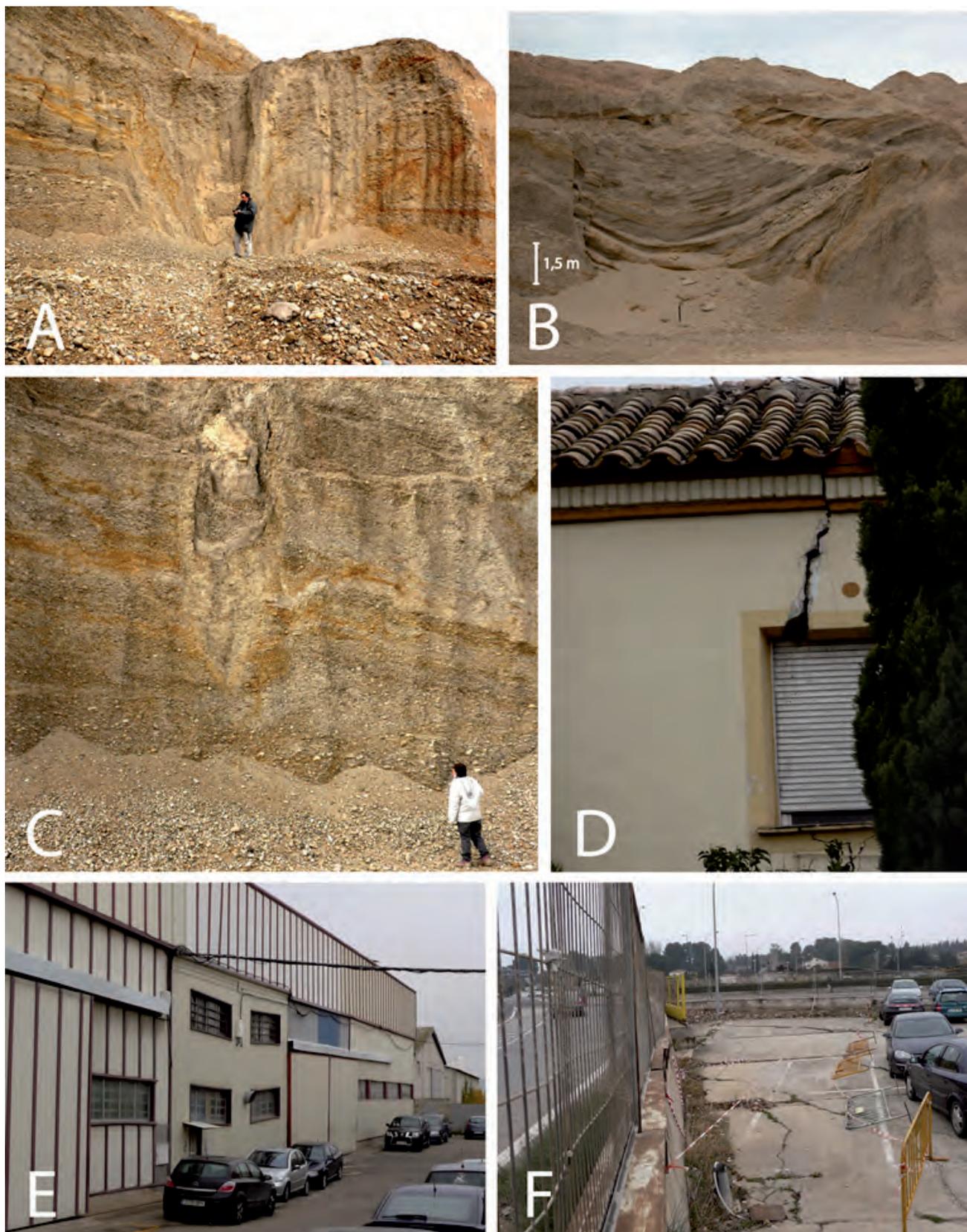


Fig. 1 - A, B, C) Esempi di paleodoline e condotti carsici in depositi detritici del Pleistocene inferiore del Fiume Ebro. D) Fratture in un condominio. E) Edificio industriale interessato da subsidenza. Si noti la deformazione delle finestre e il cambio di tonalità della zona superiore della facciata a causa delle riparazioni realizzate. F) Fratture e deformazioni nel suolo e avvallamento in un'area di parcheggio.

- A, B, C) Examples of *palaeo-dolines* and *karst conduits* in Lower Pleistocene detrital deposits of the Ebro River. D) Cracks in a building. E) Industrial building affected by subsidence. Note deformations of the windows and the different colour in the upper portion of the façade, due to the many repairing phases. F) Cracks and deformations at the ground in a parking lot.

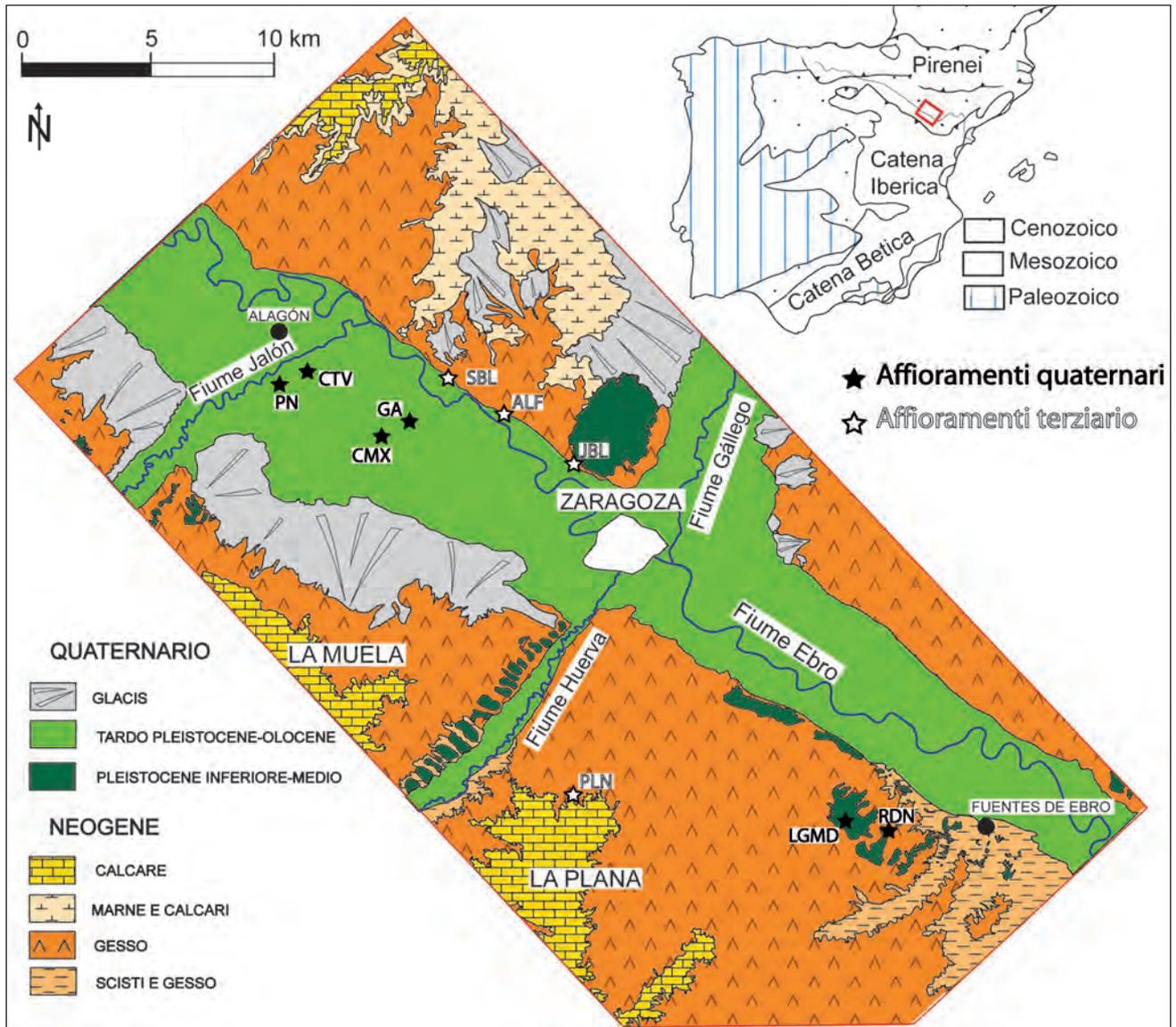


Fig. 2 - Carta geologica della zona di studio in Spagna (area centrale della valle dell'Ebro nei pressi di Saragozza).
 - Geological map of the study area in Spain (central area of the Ebro valley near Zaragoza).

tituiti, principalmente, da terrazzi del fiume Ebro e dei suoi affluenti come depositi di *glacis* (fig. 2). Tutti gli accumuli quaternari sono in discordanza angolare sulle rocce terziarie. In generale, i depositi quaternari di terrazzo, nei quali è ubicata la maggior parte della zona di studio, sono costituiti da materiali detritici a granulometria variabile, che si depositarono in un mezzo fluviale del tipo *braided* (LUZÓN *et alii*, 2008). Al di sopra dei sedimenti quaternari si formano le doline alluvionali, che risultano più numerose sui livelli più recenti di terrazzi del fiume Ebro (T1, T2 e T3; SORIANO, 1990) di età Pleistocene medio-superiore (fig. 2).

Da un punto di vista strutturale, i materiali terziari di questa zona sono interessati da faglie normali di scala da metrica a chilometrica e da una densa e pervasiva rete di diaclasi (ARLEGUI & SIMÓN, 2000). Si riconoscono due sistemi a direzioni dominanti da N-S e NW-SE a WNW-ESE che caratterizzano la fratturazione sia delle faglie che delle diaclasi (ARLEGUI, 1996). Le diaclasi e faglie N-S sono state interpretate all'interno di un campo di sforzi compressivi che evolve progressivamente verso una distensione triassiale (HANCOCK, 1991; ARLEGUI & SIMÓN, 1993; ARLEGUI, 1996). Ciò è spiegabile per la convergenza tra Eu-

ropa, Iberia e Africa. Su questo campo di sforzi si sovrappone un campo estensivo relazionato all'apertura del solco di Valencia (SIMÓN, 1986), verso est. D'altra parte, il sistema di fratture NW-SE corrisponde a faglie normali di rigetto metrico. Anche in affioramento si riconoscono piccole faglie e diaclasi con la stessa orientazione. Questo sistema di fratturazione è legato un campo di sforzi distensivi approssimativamente perpendicolare alla Cordillera Pirenaica.

Tutta questa rete di fratture interessa non solo i materiali terziari ma anche, sebbene in misura minore, i depositi quaternari. Diversi autori (SIMÓN

& SORIANO, 1985; ARLEGUI & SORIANO, 1996, 1998; ARLEGUI & SIMÓN, 2000) hanno analizzato la fratturazione nei materiali quaternari individuando tre o quattro famiglie importanti di fratture: N-S, NW-SE, NE-SW e E-W (fig. 3), la cui importanza risulta variabile da sito a sito (fig. 4).

2.2. - METODOLOGIA

Ai fini della realizzazione del presente studio, sono state utilizzate cartografie di dettaglio delle doline, alla scala 1:5000, elaborate per il Piano Urbanistico di Saragozza (SIMÓN *et alii*, 1998), che

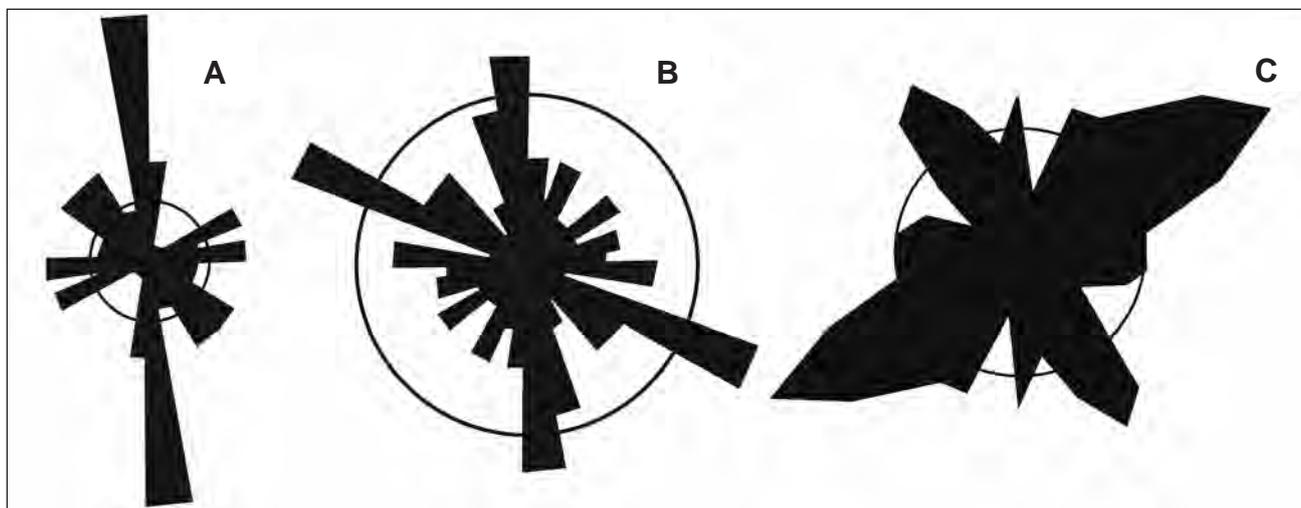


Fig. 3 - Diagrammi a rosa delle principali direzioni di fratture quaternarie nell'area di studio: A) Faglie normali (40 faglie; da ARLEGUI & SIMÓN, 2000); B) Fratture senza rigetto (1238; da ARLEGUI & SIMÓN, 2000); C) Faglie e fratture (da SIMÓN & SORIANO, 1985).
- Rose diagrams of the strike of the main Quaternary fractures in the study area: A) Normal faults (40 faults; after ARLEGUI & SIMÓN, 2000); B) Fractures without offset (1238; after ARLEGUI & SIMÓN, 2000); C) Faults and fractures (after SIMÓN & SORIANO, 1985).

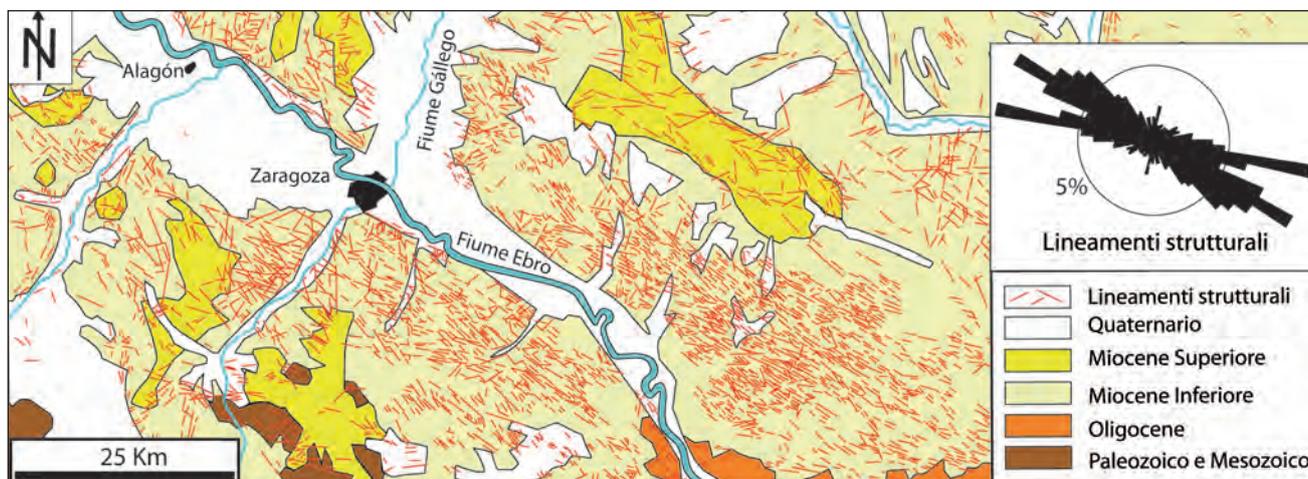


Fig. 4 - Principali lineamenti strutturali nella regione centrale della valle dell'Ebro (modificato da ARLEGUI & SORIANO, 1996).
- Main structural lineaments in the central region of the Ebro valley (modified after ARLEGUI & SORIANO, 1996).

comprendono 4 sotto-zone nell'ambito del territorio comunale. Per determinare i parametri morfometrici più importanti delle doline (area, orientazione dell'asse maggiore, percentuale di superficie con doline, ecc.) è stato utilizzato il software ImageJ, con il quale si è proceduto alla digitalizzazione e analisi delle stesse. ImageJ è un programma gratuito di processamento di immagini digitali programmato in Java, inizialmente sviluppato per l'analisi cellulare, ma che risulta molto versatile anche per uno studio tipo quello qui presentato.

Per conoscere le principali direzioni di debolezza nella zona centrale del bacino, oltre ad utilizzare dati derivanti da studi precedenti condotti nella regione (SORIANO, 1986; LUZÓN *et alii*, 2008), è stato posto in essere uno studio esaustivo di fratture e faglie, sia nei materiali terziari che in quelli quaternari (fig. 2), con susseguente analisi strutturale. Successivamente, si è proceduto al confronto dei dati ottenuti dall'analisi morfometrica e strutturale per determinare le possibili relazioni e valutare l'influenza che la fratturazione ha esercitato nello sviluppo della carsificazione attuale e delle forme risultanti. Con la stessa finalità, sono anche stati confrontati gli andamenti strutturali con le direzioni di fratturazione individuate in relazione alle paleo-doline sviluppatesi durante il Pleistocene.

2.3. - RISULTATI

Si espongono nel seguito i risultati ottenuti a partire dall'analisi morfometrica delle doline e della fratturazione.

2.3.1. - *Morfometria delle doline*

Quattro zone appartenenti al comune di Saragozza (Autovía de Logroño, Casetas, Garrapinillos e Miralbueno) sono state selezionate per l'analisi, sulla base della grande frequenza di doline (fig. 5), dello sviluppo urbano attuale e della ulteriore possibile urbanizzazione nel prossimo futuro.

I parametri morfometrici analizzati sono i seguenti: i) Numero di doline, ii) Densità di doline (rapporto tra numero di doline e superficie dell'area analizzata in km²), iii) Area minima e massima delle doline, iv) Superficie con doline (somma della su-

perficie di tutte le doline), v) Proporzionamento dell'area a doline (percentuale tra la superficie interessata da doline e l'area totale analizzata), vi) Orientazione preferenziale dell'asse maggiore delle doline, vii) Rapporto asse maggiore (a)/ asse minore (b).

A partire dalle aree analizzate si osserva che il settore nel quale il numero totale, la densità e percentuale di area con doline è maggiore è quello della Autovía di Logroño, con, rispettivamente, 125 doline, 11,87 doline/km² e 18,99%. D'altra parte, si tratta di una delle zone di questo territorio che è stata maggiormente presa in considerazione da studi precedenti (SORIANO & SIMÓN, 2002; SIMÓN *et alii*, 2008) a causa dei numerosi problemi associati allo sviluppo del carsismo nel corso degli ultimi trenta anni. Prendendo in considerazione tutti i quattro settori analizzati il numero di doline risulta molto elevato (261) e la superficie occupata corrisponde al 12,65% della superficie totale analizzata (tab. 1). Per quanto riguarda la orientazione dell'asse maggiore delle doline, le direzioni preferenziali sono NW-SE, E-W, NE-SW e N-S, elencate a partire da quelle con maggiore frequenza (fig. 6). Le doline con rapporto $a/b > 2$ presentano un andamento delle direzioni molto simile al totale delle doline (fig. 6), con direzioni preferenziali NW-SE, E-W, NE-SW e N-S. Il rapporto tra gli assi delle doline risulta molto simile in quelle di minori dimensioni (< 200 m; fig. 7). Nel complesso, il rapporto asse maggiore (a) / asse minore (b) nell'area di studio è pari a 1,95, anche se l'asse massimo delle doline di maggiori dimensioni può arrivare a essere sino a 8 volte maggiore rispetto all'asse minore.

2.3.2. - *Fratturazione*

La fratturazione è stata esaminata in 10 affioramenti, 6 dei quali nei materiali quaternari, corrispondenti a differenti livelli di terrazzi del fiume Ebro, e 4 nei depositi terziari (fig. 2), per un numero totale di fratture pari a 1317 negli affioramenti quaternari e a 386 in quelli terziari.

I materiali terziari sono principalmente interessati da fratture senza rigetto, molte delle quali risultano aperte e parzialmente carsificate, specialmente quelle nei materiali gessosi. Negli affioramenti studiati si riconoscono due famiglie di fratturazione

Tab. 1 – Valori morfometrici principali dei settori analizzati nel Bacino dell’Ebro, e dell’area totale.
- *Main morphometric parameters of the analyzed sectors in the Ebro Basin, and of the overall area.*

	Settore autostrada di Logroño	Settore Casetas	Settore Garrapinillos	Settore Miralbueno	Totale delle aree studiate
Superficie totale di studio	10,53 km ²	3,95 km ²	6,74 km ²	5,33 km ²	26,55 km ²
Numero di doline	125	32	49	55	261
Superficie minima di dolina	0.000294 km ²	0.000114 km ²	0.001562 km ²	8.086e-005	8.086e-005
Superficie massima di dolina	0,16 km ²	0,08 km ²	0,66 km ²	0,19 km ²	0,66 km ²
Densità di doline	11,87 Doline/km ²	8,10 Doline/km ²	7,27 Doline/km ²	10,31 Doline/km ²	9,83 Doline/km ²
Area con doline	2 km ²	0,57 km ²	0,66 km ²	0,19 km ²	3,36 km ²
Percentuale di superficie con doline	18.99%	14.43%	9.79%	3.59%	12.65%
Orientamento asse maggiore	N005-015E N045-065E N080-095E N115-130E	N040-060E N115-125E N130-140E	N010-025E N040-060E N095-115E N130-150E N160-180E	N025-040E N050-070E N110-125E N170-180E	N045-065E N080-100E N110-125E N160-180E
Rapporto asse maggiore (a) / asse minore (b)	2.09	1.99	2.03	1.51	1.95

ben diversificate, la principale NE-SW e la secondaria NW-SE.

La fratturazione nei materiali quaternari (faglie normali e inverse e fratture senza rigetto; fig. 8C) mostra una considerevole dispersione nelle direzioni anche se si possono distinguere quattro famiglie, le tre principali NW-SE, NNE-SSW e SSE-NNW, con l’aggiunta della secondaria E-W. Queste fratture si rinvengono sia isolate che associate a paleo-collapsi (morfologie sinformi con deformazioni interne e materiale de-strutturato; figura 8 A e B e figura 1 A, B e C). Non si notano differenze sostanziali tra le direzioni di frattura degli affioramenti non associati a paleo-doline e di quelli a queste associati (fig. 9). Analogamente non si osservano differenze significative nella direzione delle fratture tra i diversi affioramenti di età distinta né tra quelli appartenenti a diversi terrazzi.

2.3.3. - *Confronto delle fratture e assi massimi delle doline*

Il confronto tra le direzioni degli assi massimi delle doline con le fratture individuate nei diversi

affioramenti terziari e quaternari mostra che tutte le direzioni principali di allungamento osservate nelle doline (NW-SE, E-W, NE-SW e N-S), corrispondono a direzioni di fratturazione, sia identificate in questo studio che in lavori precedenti (fig. 10). Lo stesso avviene per la orientazione delle fratture e faglie associate a paleo-doline sviluppatesi durante il Pleistocene. In generale, non si osserva una corrispondenza tra il numero di doline che presentano un asse di allungamento con una direzione determinata e la importanza di questa direzione di fratturazione. Per esempio, l’asse dominante nelle doline NW-SE è la direzione principale di fratture nel Quaternario e nelle lineazioni ma non nel Terziario o nelle fratture analizzate da ARLEGUI & SIMÓN (2000) a nord della valle dell’Ebro. D’altra parte, la direzione N-S, molto importante nella fratturazione dei materiali quaternari, e anche osservata in diversi elementi del paesaggio come la direzione di svariati affluenti dell’Ebro e valli di pianura (ARLEGUI & SORIANO, 1996), è quella che ha minore importanza per lo sviluppo dell’asse massimo delle doline.

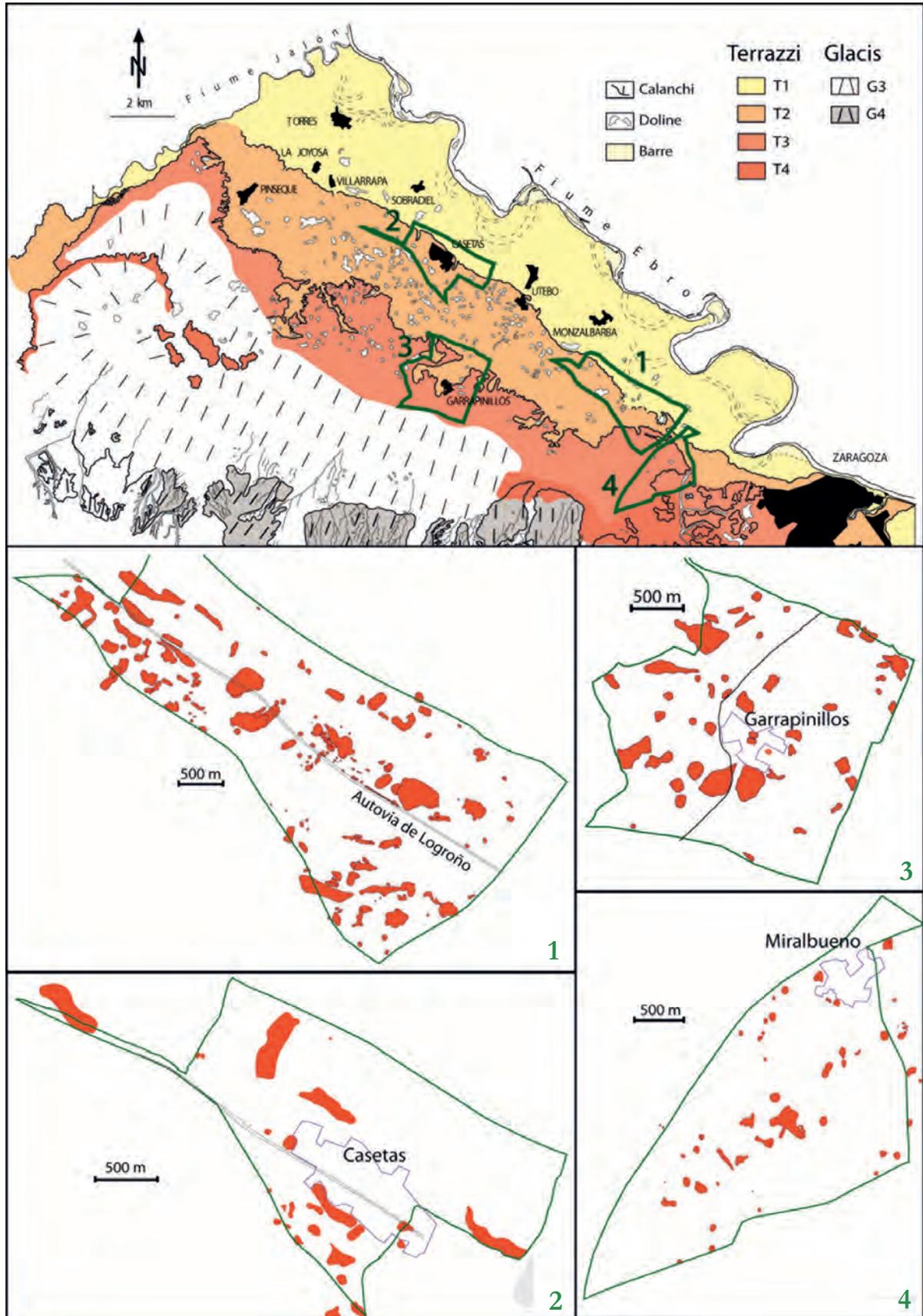


Fig. 5 - Ubicazione e dettagli delle aree analizzate, in scala 1:5,000 (1: Autovía de Logroño, 2: Casetas, 3: Garrapinillos, 4: Miralbueno).
 - Location and details of the studied areas, at scale 1:5,000 (1: Autovía de Logroño, 2: Casetas, 3: Garrapinillos, 4: Miralbueno).

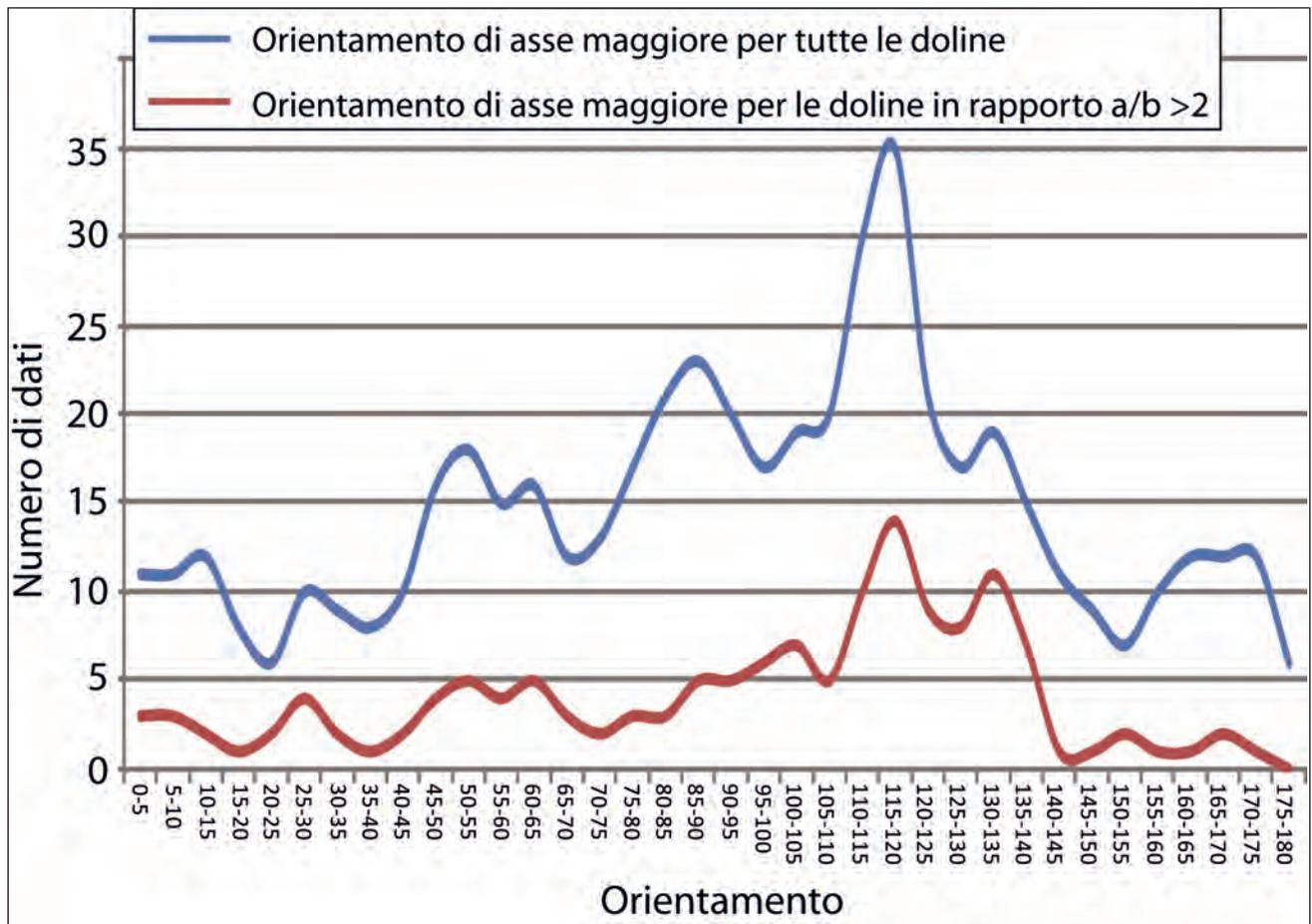


Fig. 6 - Grafico con le orientazioni degli assi maggiori delle doline delle quattro zone esaminate (in azzurro), e doline con rapporto $a/b > 2$ (in rosso).
 - Graph showing the strikes of the major axis of dolines in the four examined areas (in blue), and dolines with ratio $a/b > 2$ (in red).

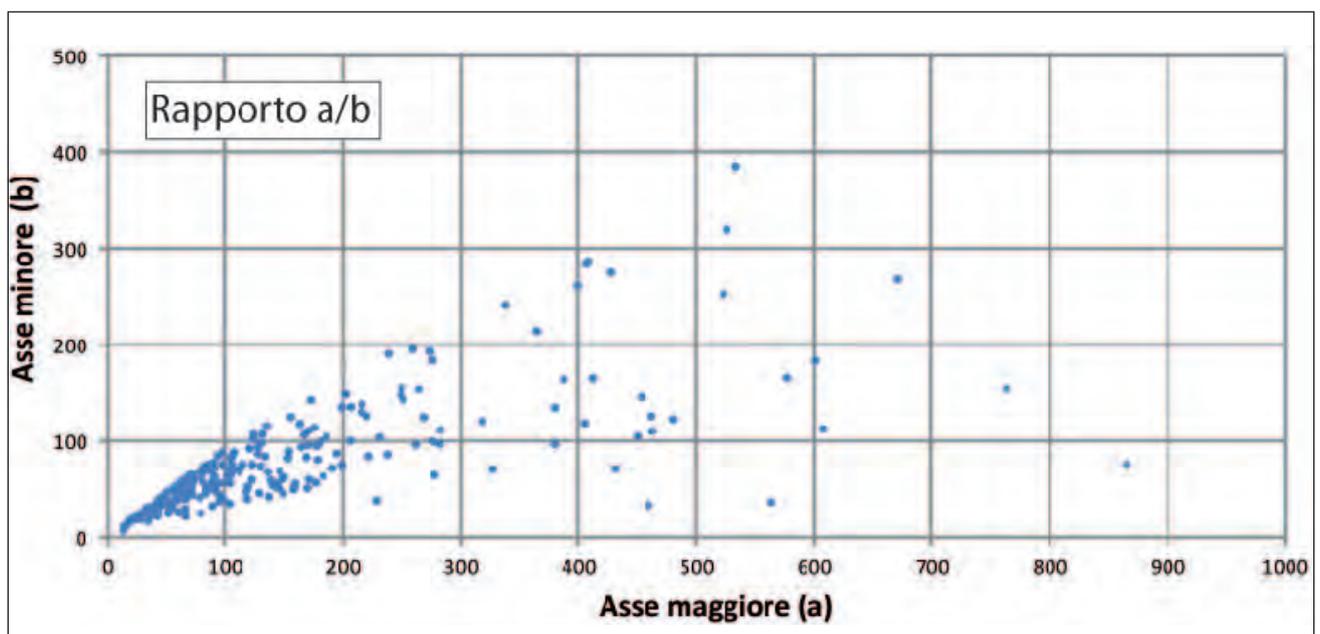


Fig. 7 - Grafico del rapporto asse maggiore (a) / asse minore (b) di tutte le doline analizzate.
 - Graph of the ratio between major axis (a) / and minor axis (b) for all the analyzed dolines.

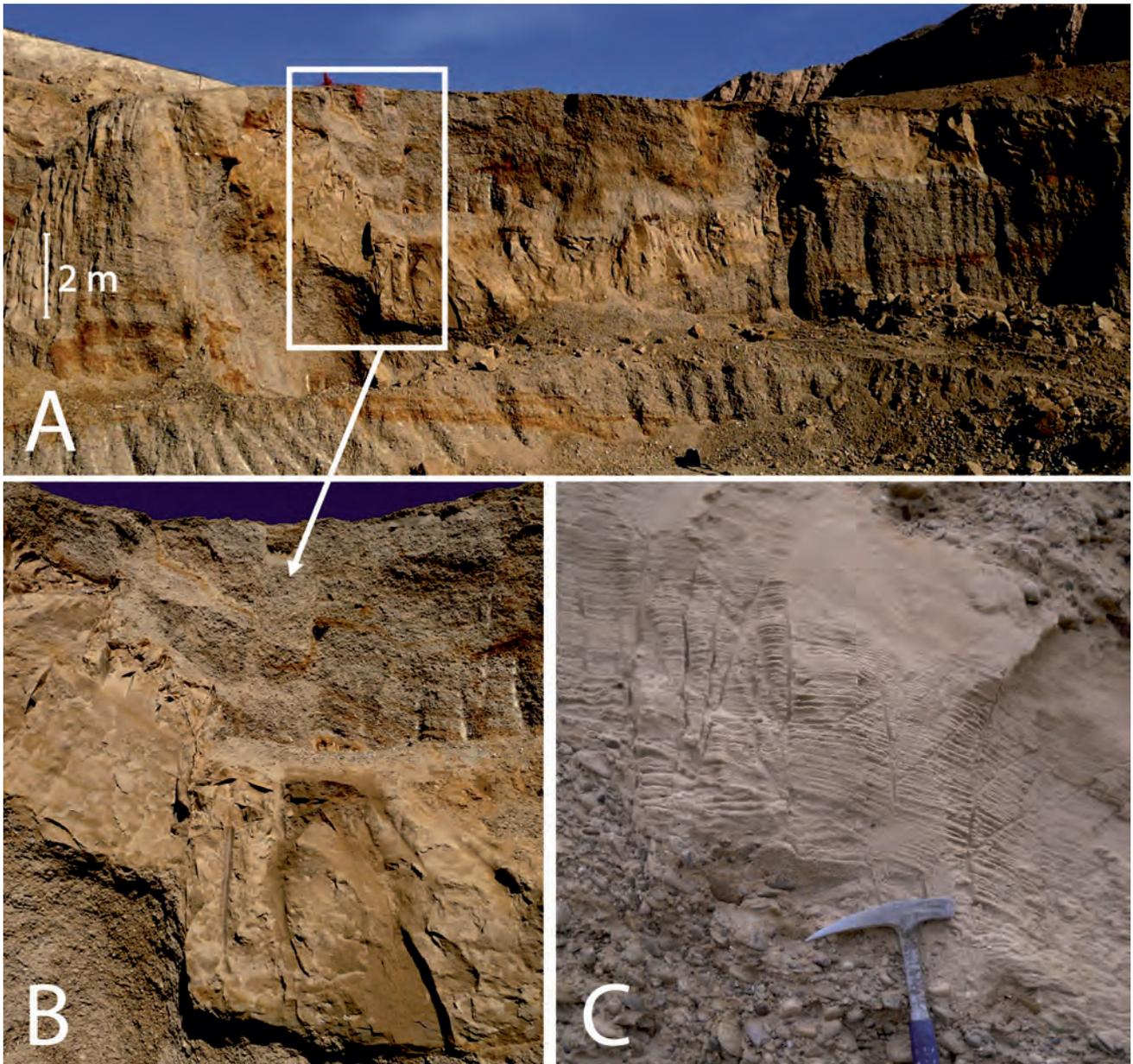


Fig. 8 - A) Paleo-collasso con morfologia sinforme e faglie nel materiale detritico del Pleistocene inferiore. B) Particolare della deformazione e faglie all'interno del paleo-collasso. C) Fratture e faglie nelle arenarie del Pleistocene medio-superiore.

- A) Palaeo-collapse with syncline morphology and faults in the lower Pleistocene debris deposits. B) Close up view of the deformation and faults within the palaeo-collapse. C) Fractures and faults in the middle-upper Pleistocene sandstones.

2.4. - DISCUSSIONE

La coincidenza tra la direzione dell'asse massimo delle doline e buona parte delle direzioni di fratturazione nei materiali terziari e quaternari e con le lineazioni strutturali NW-SE localizzate in tutto il bacino dell'Ebro (ARLEGUI & SORIANO, 1996, 1998), evidenzia il controllo esercitato dalle discontinuità NW-SE nei processi carsici e nella conseguente formazione di doline. Come indicato

da ARLEGUI & SORIANO (1996, 1998) questa direzione condiziona gran parte del Quaternario della regione. La stessa valle del fiume Ebro presenta direzione N120E, e la evoluzione e arretramento della scarpata settentrionale che la delimita sembra condizionata da questa stessa direzione di fratturazione (GUTIÉRREZ *et alii*, 1994); inoltre, c'è una grande quantità di piccole valli che formano la maggior parte della rete di drenaggio con identiche direzioni.

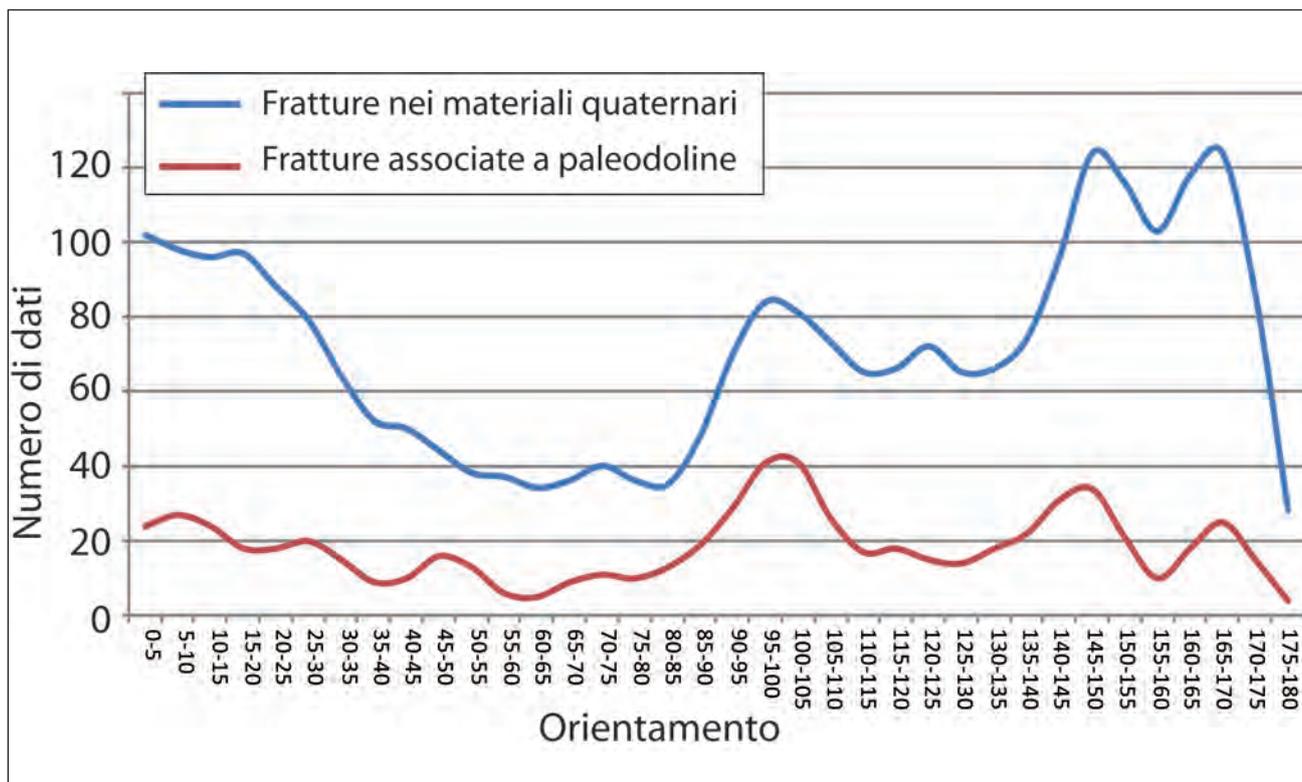


Fig. 9 - Confronto tra le direzioni di fratturazione degli affioramenti Quaternari e le fratture associate a paleodoline.
 - Comparison between the strike of fractures of the Quaternary outcrops and the fractures associated to palaeo-dolines.

La maggiore pervasività e ricorrenza di faglie NW-SE nei materiali evaporitici terziari, che si deduce dal controllo che questa direzione esercita sulla maggior parte delle forme del paesaggio nella zona centrale del Bacino dell'Ebro, faciliterebbe il suo funzionamento come via preferenziale per la circolazione di acqua e lo sviluppo di un possibile acquifero profondo nei gessi, del quale si hanno indizi per mezzo di sondaggi geognostici. Questa carsificazione condizionata dalle strutture sarebbe all'origine nella copertura alluvionale di collassi e fratture con direzioni NW-SE e doline superficiali allungate in questa direzione.

D'altra parte, è probabile che la gran parte dei fattori implicati nella formazione e sviluppo delle doline (spessore dei depositi quaternari, profondità del livello freatico, caratteristiche litologiche e solubilità dei materiali evaporitici terziari, ecc.) mascherino in qualche maniera l'effetto della fratturazione terziaria nello sviluppo della fratturazione nei materiali quaternari e la morfologia delle doline superficiali. La validità dei risultati presentati va corroborata in futuro con una maggiore

quantità di dati e osservazioni.

La carsificazione dei materiali evaporitici sviluppata al di sotto della copertura alluvionale dei depositi del fiume Ebro e dei suoi affluenti è stata prodotta nel corso di tutto il Quaternario e continua attualmente causando numerosi problemi e danni economici.

L'analisi della morfologia delle doline e della fratturazione che interessa il Terziario e Quaternario della zona mostra l'esistenza di quattro direzioni preferenziali (NW-SE, NE-SW, N-S e E-W). La direzione principale di allungamento delle doline è NW-SE, coincide con la famiglia di fratture terziarie e quaternarie e con le lineazioni strutturali più abbondanti presenti nella regione centrale del Bacino dell'Ebro. La presenza di fratture NW-SE molto pervasive e continue favorisce la circolazione dell'acqua e la carsificazione del substrato evaporitico in questa stessa direzione, provocando la formazione di depressioni nei materiali quaternari sovrastanti, con una direzione di fratturazione simile, e producendo in superficie doline di copertura allungate NW-SE.

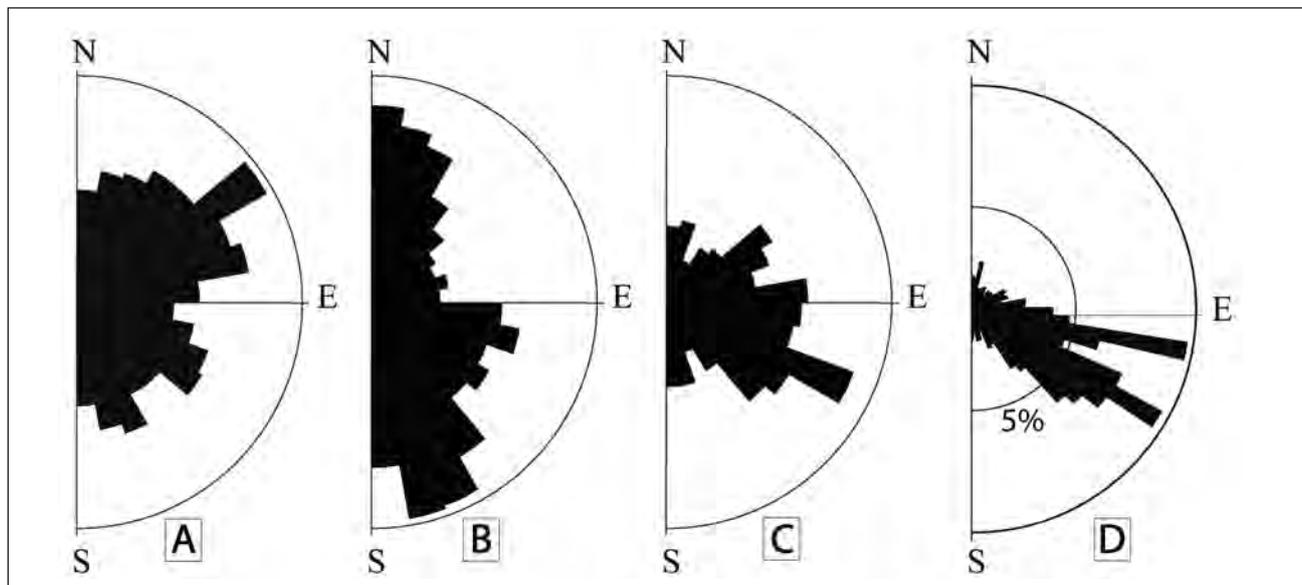


Fig. 10 - Confronto tra la direzione totale delle fratture nei materiali quaternari e terziari, lunghezza totale delle doline analizzate e principali lineazioni. A) Fratture in materiale terziario (386 fratture), diagramma ottenuto da dati degli autori integrati da precedenti studi (SORIANO, 1986; LUZÓN *et alii*, 2008). B) Fratture nei materiali quaternari (1317 fratture). C) Lunghezza dell'asse massimo delle doline analizzate (261 doline). D) Direzione delle lineazioni nella regione, da ARLEGUÌ & SORIANO (1996).

- Comparison among the strike of the fractures in the quaternary and tertiary deposits, total length of the analyzed dolines and main lineaments. A) Fractures in tertiary deposits (386 fractures), graph obtained from Authors' own data integrated by previous studies (SORIANO, 1986; LUZÓN *et alii*, 2008). B) Fractures in the quaternary deposits (1317 fractures). C) Length of the major axis of the analyzed dolines (261 dolines). D) Lineaments strike in the region, after ARLEGUÌ & SORIANO (1996).

3. - L'AREA DI STUDIO IN ITALIA: IL SETTORE DI BARBARANO DEL CAPO (SALENTO)

3.1. - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La Penisola Salentina costituisce il settore più meridionale della Puglia e rappresenta, assieme al Gargano e alle Murge, una delle tre principali aree carsiche della regione. L'impalcatura della Penisola Salentina è costituita prevalentemente da depositi carbonatici, in facies che variano da piattaforma interna ad ambiente litorale, in una successione discontinua di età compresa tra il Cretaceo superiore e il Pleistocene inferiore (fig. 11). I depositi del Cretaceo affiorano prevalentemente lungo strette dorsali orientate NNW-SSE (le Serre Salentine), mentre lembi discontinui di depositi Paleogenici e Neogenici sono rimasti preservati in corrispondenza dei bassi strutturali. Nella zona di indagine, rappresentata dall'area di Barbarano del Capo (comune di Morciano di Leuca, prov. Lecce), le dorsali delle Serre di Montesardo e Serre Falitte portano a giorno i calcari del Cretaceo, mentre nei bassi strutturali affiorano le calcareniti plio-quaternarie,

sulle quali sono impostate le due principali cavità carsiche dell'area, Vora Grande e Vora Piccola. Il termine *vora* è molto diffuso in Salento per indicare un inghiottitoio o un punto di assorbimento di acqua, in genere l'accesso verticale a cavità, in maniera analoga al termine *grave* nelle Murge e nel Gargano; l'etimologia del termine si fa risalire alla forma latina *vorago*, ed a quella tardo latina *vora*, entrambe da *vorare*, che significa divorare, inghiottire (PARISE *et alii*, 2003).

Dal punto di vista geodinamico, il Salento rappresenta uno dei più estesi blocchi emersi dell'Avampaese Apulo, la cui deformazione è legata all'orogenesi appenninica, tra l'Oligocene superiore e il Pleistocene inferiore. Il blando piegamento che ha prodotto le dorsali delle Serre Salentine, portando a scala regionale l'avampaese all'attuale assetto antifforme (DOGLIONI *et alii*, 1994), è associato a faglie ad alto angolo prevalentemente distensive e con orientazione appenninica (NW-SE e NNW-SSE) ed anti-appenninica (NE-SW; fig. 12). Queste strutture principali, a cui si sommano sistemi di faglie minori con andamento E-W, hanno registrato le fasi collisionale e post-collisionale dell'orogenesi appenninica (TOZZI, 1993).

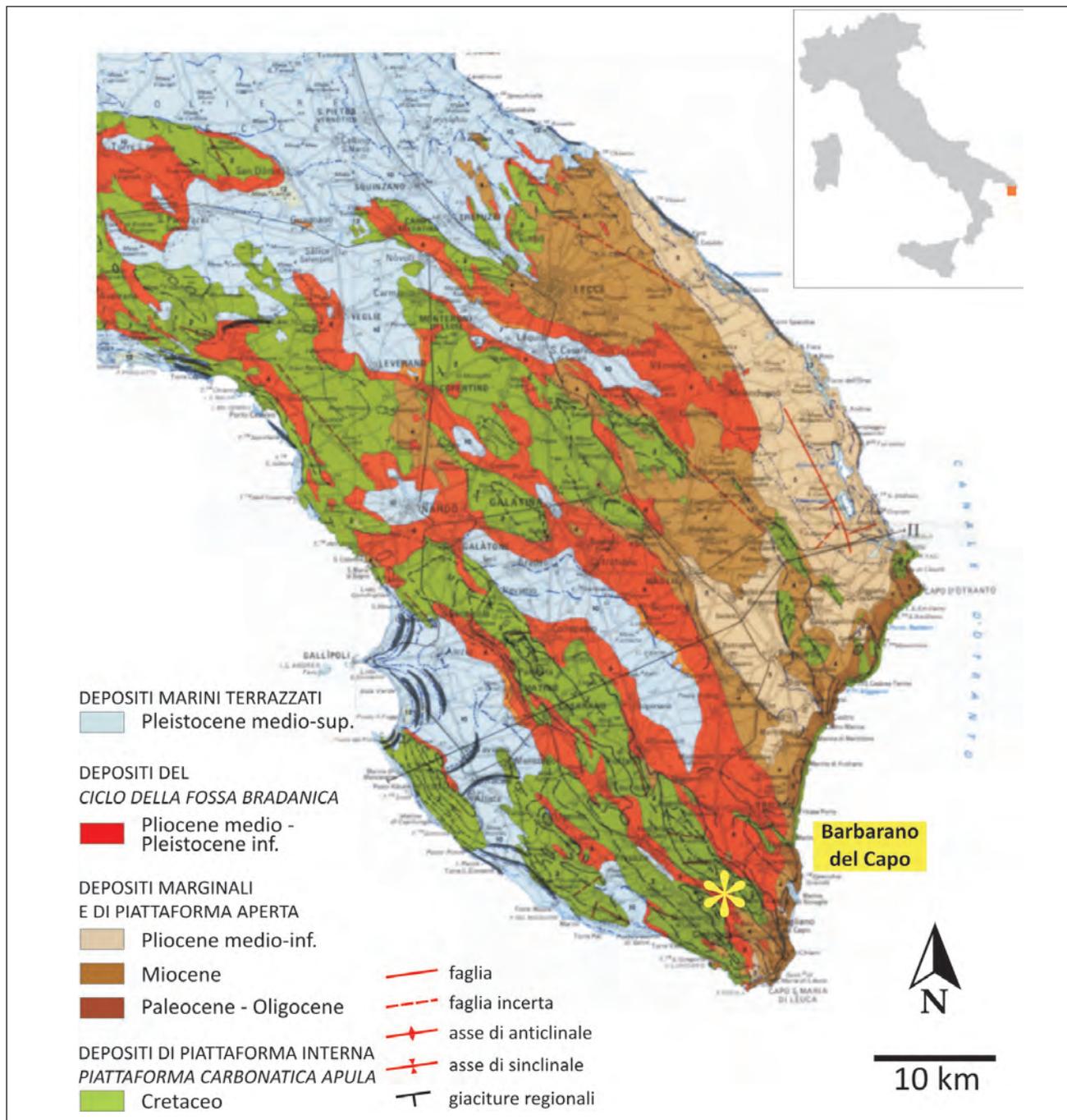


Fig. 11 – Carta geologica del Salento (da CIARANFI *et alii*, 1988), con ubicazione dell’area di interesse.
 – Geological map of Salento (after CIARANFI *et alii*, 1988), and location of the study area.

3.2. - SCOPO DEL LAVORO E METODI

Il presente studio è finalizzato all’analisi dei caratteri morfometrici delle doline e delle altre forme di origine carsica presenti nell’area di indagine, valutandone la possibile relazione con le discontinuità tettoniche locali e con le strutture regionali. A tale scopo, è stata redatta una carta idro-geomorfologica,

basata sull’integrazione di osservazioni sul campo e di interpretazione stereoscopica di fotogrammi aerei. Le foto aeree analizzate si riferiscono a un lasso temporale compreso tra il 1955 e il 2001. Questa fase ha permesso di individuare le principali forme superficiali, e di rappresentarle sulla base topografica in scala 1:5.000 (Carta Tecnica Regionale). In particolare, ai fini dell’analisi morfometrica, si è ritenuto opportuno

effettuare una distinzione gerarchica nell'ambito delle forme del paesaggio carsico censite, in funzione essenzialmente della loro visibilità rispetto al paesaggio circostante, e quindi della estensione e dell'entità del dislivello tra depressione e relativi margini. Con il termine "doline" sono state designate le forme più circoscritte e con marcato dislivello negativo; queste di frequente si sviluppano all'interno di più estese, e meno marcate morfologicamente, "depressioni".

Dalla carta idro-geomorfologica così ottenuta, sono stati estrapolati i dati necessari per l'analisi morfometrica, effettuata separatamente sia sulla popolazione di "doline", che su quella delle "depressioni". I parametri presi in considerazione, in quanto ritenuti più rappresentativi ai fini descrittivi, sono: i) Numero di doline, ii) Estensione minima e massima delle doline, iii) Densità di doline (rapporto tra numero delle doline ed estensione dell'area analizzata in km²), iv) Superficie con doline (estensione complessiva delle doline), v) Per-

centuale dell'area con doline rispetto all'estensione dell'area analizzata, vi) Media del rapporto tra asse maggiore (a) ed asse minore (b) delle doline.

In una fase successiva, sono state selezionate delle stazioni ottimali per il rilevamento di dati strutturali. La scelta dell'ubicazione dei punti di misura ha garantito una copertura uniforme dell'area di indagine. Dei 15 punti di misura, 8 si distribuiscono sulle Serre Salentine (Serra di Montesardo a NE e Serra Falitte a SW) e 7 nei bassi strutturali. In ogni stazione sono state misurate le direzioni delle discontinuità tettoniche presenti in loco, per un numero minimo di 40 dati per stazione. I risultati sono stati successivamente analizzati statisticamente e plottati su diagrammi di vario tipo (diagrammi a rosa, curve cumulate, ecc.).

3.3. - RISULTATI

3.3.1. - Carta idro-geomorfologica della zona di Barbarano del Capo

La carta idro-geomorfologica redatta (fig. 13) mostra una buona corrispondenza tra l'andamento dei principali elementi morfologici nell'area di indagine e le strutture osservate a scala regionale. Tra le forme carsiche superficiali prevalgono "doline" e "depressioni", mentre scarseggiano le forme fluvio-carsiche, i cui pochi esemplari si individuano lungo le scarpate che delimitano le Serre. Gli assi maggiori delle forme carsiche individuate si orientano prevalentemente in direzione NW-SE e NE-SW. In corrispondenza dei bassi strutturali, le "depressioni" presentano maggiori estensioni ed un marcato allungamento in direzione appenninica.

Per quanto riguarda gli sprofondamenti da collasso, caratterizzati da maggiore evidenza morfologica e evidente dislivello negativo, la fotointerpretazione ha rivelato la presenza, oltre a Vora Grande e Vora Piccola, di altre tre situazioni, colmate dopo gli anni '70 e che attualmente sono comprese all'interno di aree abitate. Sopralluoghi in loco hanno confermato questa ipotesi, constatando bruschi dislivelli negativi in questi siti, unico elemento che rimane tuttora a testimonianza dell'origine di tali forme (fig. 14). Tutti i *sinkhole* colmati si impostano lungo il medesimo basso strutturale delle due vore di Barbarano.

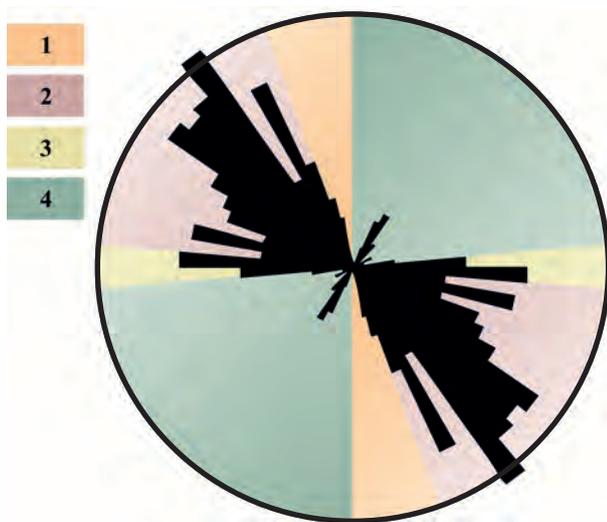


Fig. 12 - Orientazione dei lineamenti tettonici regionali in Salento (da TOZZI, 1993). Legenda: 1) sistema NNW-SSE: faglie sub-verticali, trascorrenti e dirette, ben rappresentate dalle scarpate morfotettoniche che delimitano le Serre Salentine (Miocene - post Pliocene); 2) sistema NW-SE: faglie sub-verticali dirette, ben sviluppate nell'altopiano delle Murge, dove hanno prodotto un assetto ad horst e graben (Miocene); 3) sistema E-W: faglie sub-verticali dirette, che marcano il limite tra l'altopiano delle Murge e il Salento (Eo-Oligocene); 4) sistemi NE-SW: faglie sub-verticali dirette (Plio-Pleistocene).

- Trend of regional tectonic lineaments in Salento (after TOZZI, 1993). Key: 1) NNW-SSE system: sub-vertical, transcurrent and normal faults, well expressed by the morphotectonic scarps bounding the Serre Salentine (Miocene - post Pliocene); 2) NW-SE system: normal sub-vertical faults, well developed in the Murge plateau, where they have produced a horst and graben setting (Miocene); 3) E-W system: normal sub-vertical faults, marking the boundary between the Murge plateau and Salento (Eo-Oligocene); 4) NE-SW systems: normal sub-vertical faults (Plio-Pleistocene).

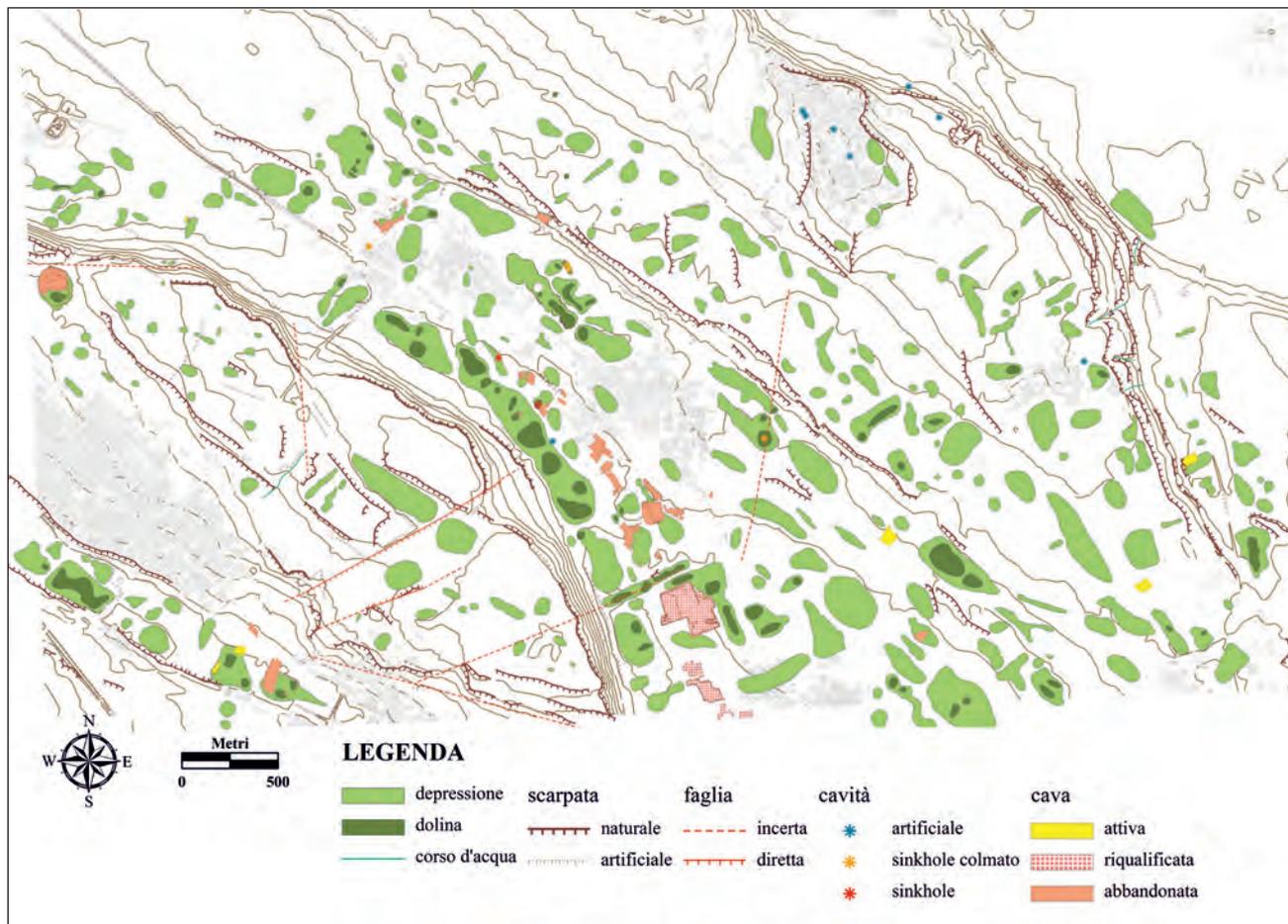


Fig. 13 – Carta idro-geomorfologica di Barbarano del Capo (Morciano di Leuca – LE).
 – Hydro-geomorphological map of the Barbarano del Capo area (Morciano di Leuca – Lecce province).

3.3.2. - Le Vore di Barbarano

Le Vore di Barbarano sono ubicate alla periferia orientale di Barbarano, piccola frazione di Morciano di Leuca, a poche centinaia di metri dal Santuario della Madonna del Belvedere di Leuca Piccola, che ospita un ipogeo scavato nelle calcareniti (SAMMARCO & PARISE, 2008). Denominate Vora Grande e Vora Piccola per le rispettive dimensioni, i due sprofondamenti distano poche centinaia di metri e sono stati compiutamente descritti la prima volta alla fine del XIX secolo a cura dello studioso salentino Cosimo De Giorgi (DE GIORGI, 1896).

Vora Grande (PU 114 nel Catasto delle Grotte Naturali della Puglia, a cura della Federazione Speleologica Pugliese, <http://www.fspuglia.it/>) è attualmente recintata in tutta la sua estensione, ed è lo sprofondamento ubicato più a sud, mentre Vora Piccola (PU 115 nel Catasto delle Grotte Naturali

della Puglia) si trova a qualche decina di metri dalla stradina che conduce al suo citato Santuario. Le due Vore hanno profondità, rispettivamente, di 35 m e 25 m, e assi di maggiore lunghezza pari a 30 m in



Fig. 14 – Evidenza attuale di un antico sprofondamento colmato dopo gli anni 70.
 – Present evidence of an ancient sinkhole, filled after the 1970s.

direzione N-S (Vora Grande) e 15 m in direzione NW-SE (Vora Piccola). Vora Grande presenta forma ellittica in pianta, con asse maggiore orientato N-S; l'analisi del rilievo della voragine mostra invece, in profondità, un allungamento preferenziale in senso NW-SE (BECCARISI *et alii*, 2003). Vora Piccola ha forma ellittica meno marcata, tendente in direzione NW-SE.

Le pareti verticali delle vore, e i caratteri di resistenza meccanica delle calcareniti, rendono i due siti ancora potenzialmente instabili, come dimostrato di recente dal crollo di una significativa porzione del margine SSE di Vora Grande, avvenuto nel febbraio 2011 a seguito di intense precipitazioni (PEPE & PARISE, 2011; fig. 15).

Morfologicamente, le Vore si aprono su un pianoro allungato in direzione NW-SE, delimitato ai bordi da pendii che conducono al rilievo di Serre Falitte sul versante sud-occidentale e a quello su

cui si sviluppa l'abitato di Montesardo sul versante nord-orientale. Il dislivello tra fondovalle e dorsali risulta compreso tra i 20 e i 30 metri; seppur non marcata, tale differenza altimetrica determina, in territori a scarsa energia di rilievo quali le porzioni interne del Salento (PALMENTOLA, 1987; PARISE, 2008a), una certa variabilità morfologica.

Oltre agli aspetti storico-religiosi legati alla presenza del Santuario, la presenza dell'uomo in epoche passate nella zona delle vore è testimoniata da ben conservate carraie di epoca romana scavate nella roccia calcarenitica, e dalla diffusa presenza di cave (SAMMARCO & PARISE, 2008) che, come si accennerà più avanti, potrebbero avere svolto un ruolo non secondario nella formazione degli sprofondamenti. La locale calcarenite è stata infatti estratta e cavata su ampi settori del pianoro, e costituiva, per la facilità di lavorazione e l'immediatezza di reperimento, il materiale più diffuso

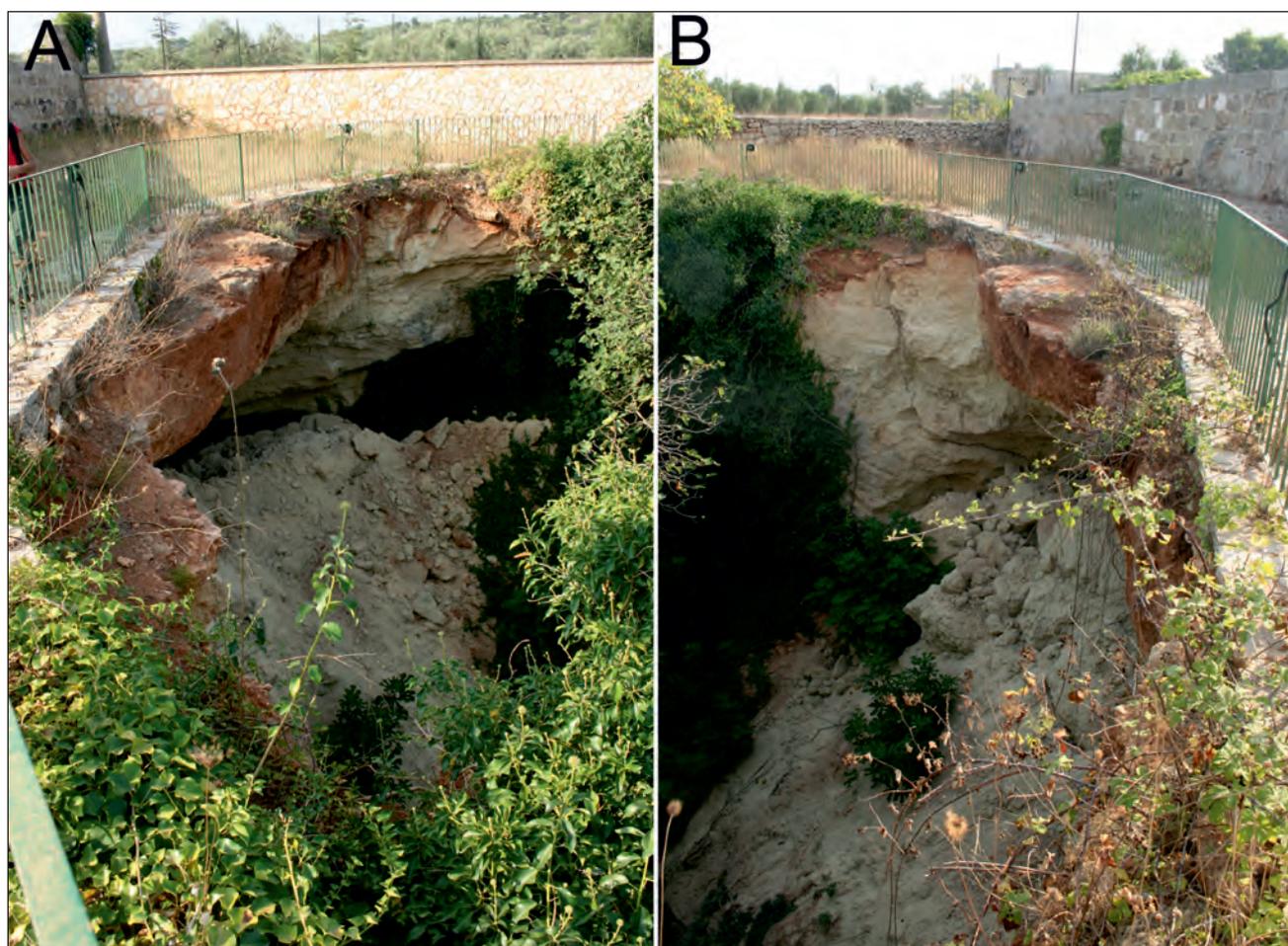


Fig. 15 – Il recente crollo, avvenuto nel febbraio 2011, al margine SSE di Vora Grande di Barbarano, visto da SW (A) e da NE (B).
– The recent collapse (February 2011) at the SSE margin of Vora Grande di Barbarano, from the SW (A) and the NE (B).

nell'edilizia dell'antichità. La litostratigrafia osservabile sulle pareti delle due vore è riconducibile a tre livelli principali (BOSSIO *et alii*, 1987, 1998): il primo, sommitale, è rappresentato da una calcarenite ben cementata, di spessore di 4,5-5 metri. Al di sotto, fino a circa 20 metri di profondità, sono presenti sabbie calcaree di colore giallastro, che nei primi 4-5 metri a partire dall'alto si intercalano a livelli irregolari con maggiore grado di litificazione. Al di sotto delle sabbie si rinviene una calcarenite giallastra, a luoghi calcirudite, in banchi decimetrici. Le pareti delle vore presentano nella parte più alta una evidente erosione selettiva nell'ambito dei livelli meno litificati delle sabbie calcaree. A tali fenomeni si associa inoltre la presenza di condotte carsiche e piccole cavità interstrato. L'erosione congiunta, carsica e meccanica, ha determinato la formazione di cengie che si affacciano all'interno della voragine, raggiungibili grazie a passaggi artificiali scavati nella roccia calcarenitica. Ampi coni detritici occupano la parte bassa delle voragini, occludendo ogni eventuale possibilità di prosecuzione all'interno dei sistemi ipogei.

Supponendo che il livello carsico di base fosse posto a profondità comprese tra i 10 e i 20 metri dall'attuale fondo delle vore, BECCARISI *et alii* (2003) hanno ipotizzato una evoluzione degli sprofondamenti che partiva dalla formazione di una protogrotta, dal suo ampliamento per processi chimici ed erosionali, e dalle prime fasi di crollo, con aumento nell'altezza della cavità. La progressiva migrazione della cavità verso l'alto portò ad intercettare i livelli di sabbie meno litificate, determinando un'accelerazione dei processi, sia in termini di crolli successivi che di ampliamento e migrazione verso l'alto. Come già evidenziato altrove (PARISE, 2008b) si ritiene che tale fase sia poi rapidamente progredita, sino a raggiungere il livello superficiale di calcarenite, senza dover necessariamente invocare fenomeni di condensazione di vapori che avrebbero ulteriormente favorito la dissoluzione dell'ammasso carbonatico (BECCARISI *et alii*, 2003); non si hanno infatti evidenze di morfologie ipogee connesse a questo tipo di dissoluzione. Infine, il livello calcarenitico sommitale, interessato da sistemi di discontinuità e indebolito dalla presenza del vuoto sottostante, sarebbe crol-

lato, determinando l'apertura degli sprofondamenti.

La presenza delle cave, ed in particolare gli elementi connessi all'attività estrattiva che risultano troncati al margine delle vore, farebbero ipotizzare che all'epoca dell'attività di cava le vore non dovessero esistere (DELLE ROSE *et alii*, 2004; PARISE, 2008b). Tantomeno dovevano essere presenti aperture di minori dimensioni rispetto a quelle attuali, visto che queste avrebbero in ogni caso rappresentato evidenti segnali d'allarme per la realizzanda attività estrattiva. Purtroppo, la mancanza di elementi utili a porre un limite cronologico alla attività estrattiva non consente allo stato attuale di formulare alcuna ipotesi sull'epoca di occorrenza degli sprofondamenti.

3.3.3. - *Morfometria*

I parametri morfometrici valutabili nella zona di indagine variano a seconda che si considerino le "depressioni" o le "dolines", essendo le prime più numerose ed estese delle seconde (tab. 2). Le 274

Tab. 2 – Valori morfometrici principali, relativi alle "depressioni" e alle "dolines" nell'area di Barbarano del Capo.

– *Main morphometric parameters of "depressions" and "dolines" in the Barbarano del Capo area.*

ESTENSIONE DELL'AREA DI INDAGINE	20 km ²	
	DEPRESSIONI	DOLINE
Numero	274	86
Estensione minima	0,00027769 km ²	0,00019109 km ²
Estensione massima	0,16924151 km ²	0,02274375 km ²
Densità	11,87 Depressioni/km ²	8,10 Doline/km ²
Estensione complessiva	2,93 km ²	0,25 km ²
Percentuale	14.63%	1.26%
Rapporto asse maggiore (a) / asse minore (b)	2.17	1.88

“depressioni”, distribuite su una superficie di 20 km², corrispondono a una densità pari a 11,87. Questo stesso parametro è però pari a 8,10 se riferito alle “doline”. Per quanto riguarda l'estensione complessiva, si osserva una variazione di un ordine di grandezza a seconda che si considerino le “depressioni” (2,93 km²) o le “doline” (0,25 km²), variazione che si ripercuote sulla percentuale di doline, che si attesta intorno al 14,63% nel primo caso, e all'1,26% nel secondo caso. “Depressioni” e “doline” differiscono sensibilmente anche nel rapporto medio tra asse maggiore ed asse minore (a / b), che indica un allungamento maggiore nelle prime.

Plottando i rispettivi valori degli assi maggiore e minore per tutte le forme analizzate (fig. 16), si ottengono rette di regressione lineare diverse a seconda che si riferiscano alla classe delle “depressioni”, a quella delle “doline” o all'insieme indistinto di entrambe. Si osserva infatti il massimo valore del coefficiente angolare nel primo caso, il minimo nel secondo caso, e un valore intermedio nel terzo caso.

3.3.4. - *Confronto tra dati strutturali e dati morfometrici*

I dati ottenuti dal rilevamento delle discontinuità tettoniche nelle 15 stazioni di misura (fig. 17) indicano una netta prevalenza di sistemi ad orientazione appenninica su quelli ad orientazione anti-appenninica nei calcari del Cretaceo; nelle calcareniti plio-pleistoceniche, invece, si osservano brusche variazioni locali, talvolta con una distribuzione isotropa delle orientazioni, o con una prevalenza di sistemi appenninici o anti-appenninici.

I dati strutturali relativi alle discontinuità tettoniche rilevate nell'intera area di indagine mostrano una buona corrispondenza con i lineamenti tettonici regionali (figg. 12 e 18). Se si confrontano le curve cumulate relative ai dati strutturali con quelle relative all'orientazione degli assi maggiori delle forme carsiche individuate, si osserva che mentre per le “depressioni” il picco per numero di campioni corrisponde a un allungamento anti-appenninico, per le “doline” invece esso corrisponde ad un allungamento appenninico (fig. 18). Tuttavia, i picchi relativi che si osservano nella curva delle “doline” e in quella delle “depressioni” presentano una buona corrispondenza.

3.4. - DISCUSSIONE

Il riconoscimento e la cartografazione delle forme carsiche del territorio di Barbarano del Capo hanno consentito di delineare i caratteri morfologici principali dell'area di indagine e di metterli in relazione con l'assetto geologico generale. L'analisi morfometrica condotta sulle “doline” e sulle “depressioni”, che in ambito carsico presentano delle forti relazioni genetiche con gli sprofondamenti, ha messo in evidenza valori di densità, estensione e rapporto medio tra gli assi sostanzialmente maggiori se si prendono in considerazione le seconde. L'analisi delle discontinuità tettoniche, regionali e locali, ha poi permesso di apprezzare il condizionamento degli elementi geologico-strutturali, a diversa scala, nello sviluppo di depressioni carsiche e sprofondamenti. Nonostante in generale si osservi una buona corrispondenza tra andamento delle strutture a diversa scala e andamento degli assi maggiori delle depressioni carsiche, esiste una leggera discrepanza tra gli allungamenti preferenziali delle “doline” e delle “depressioni”. Sebbene i principali lineamenti tettonici del Salento, e in particolare della sua porzione meridionale, fossero già stati in passato oggetto di studio (BOSSIO *et alii*, 1987; CIARANFI *et alii*, 1988; TOZZI, 1993), non vi sono studi in letteratura riguardanti nello specifico le relazioni esistenti tra tettonica e strutture (identificate nei vari litotipi affioranti) e carsismo. L'argomento, di sicuro interesse anche per le rilevanti implicazioni idrogeologiche, va certamente approfondito, considerando più vasti areali nell'ambito della Penisola Salentina, e prendendo in esame ulteriori dati, derivanti ad esempio dalla esecuzione di rilievi geologico-strutturali all'interno delle cavità carsiche presenti nell'area.

4. - CONCLUSIONI

La conoscenza dei principali elementi condizionanti la genesi e l'evoluzione dei sinkhole è un elemento essenziale ai fini di qualunque azione volta a mitigare il rischio derivante da tale tipologia di fenomeni. La molteplicità di fattori che interagiscono in ambiente carsico, congiuntamente alla possibilità di occorrenza di sprofondamenti sia in connessione

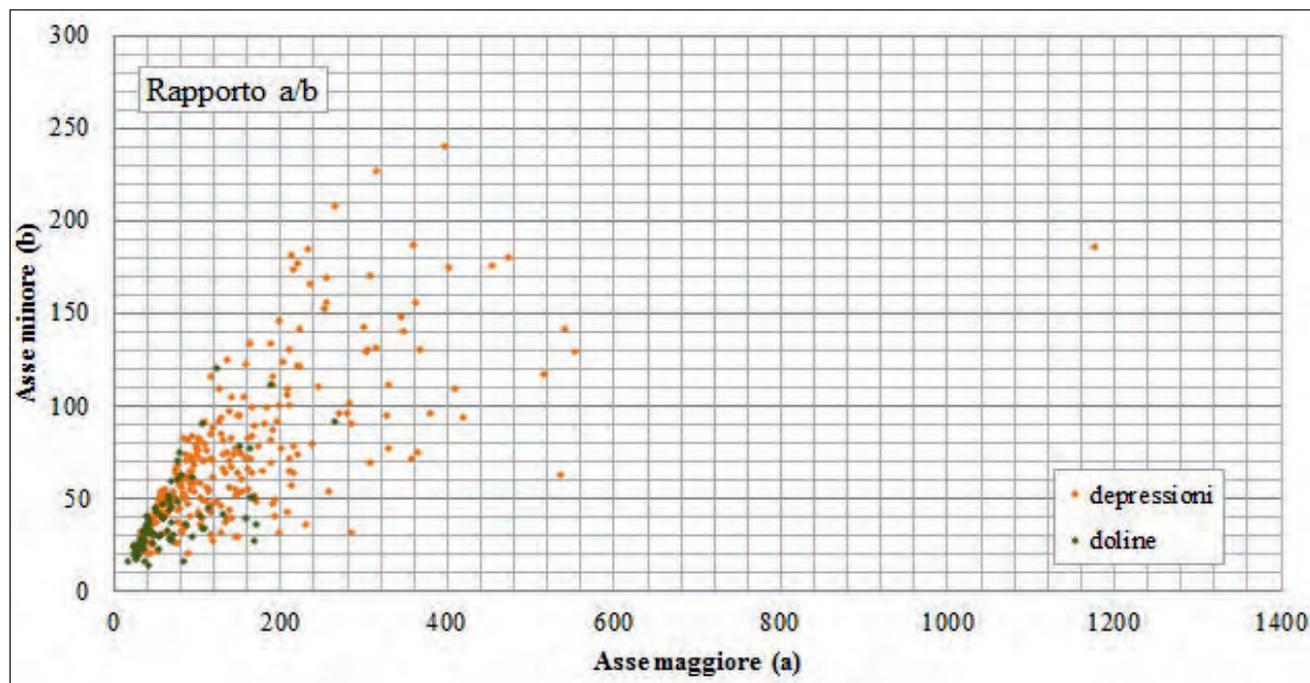


Fig. 16 – Valori (in metri) del rapporto tra asse maggiore (a) ed asse minore (b) nelle “doline” e nelle “depressioni”.
 – Values (in meters) of the ratio major (a) – minor axes (b) in the landform “doline” and “depressions”.



Fig. 17 – Ubicazione delle 15 stazioni di misura e diagrammi a rosa dei relativi dati raccolti.
 – Location of the 15 measurement stations and rose diagrams of collected data.

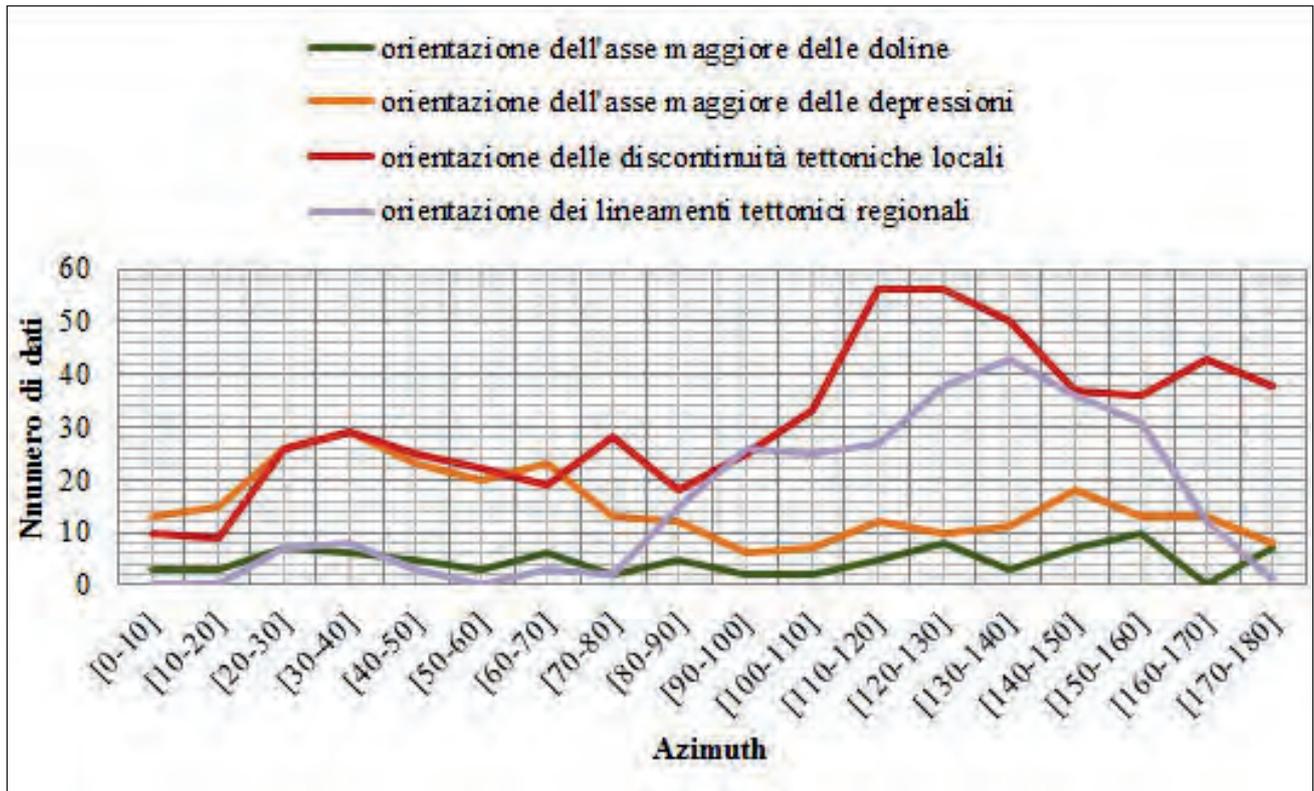


Fig. 18 – Confronto tra orientazione degli assi maggiori di “doline” e “depressioni”, orientazione delle discontinuità tettoniche locali e dei lineamenti regionali, espresse in numero di campioni.

– Comparison between direction of the major axes of “dolines” and “depressions”, strike of the local tectonic discontinuities, and strike of the regional tectonic discontinuities.

a cavità naturali che a vuoti di origine antropica, rendono l'argomento particolarmente complesso (PARISE & GUNN, 2007; PARISE, 2010; DE WAELE *et alii*, 2011). L'esame di situazioni come quelle descritte nel presente lavoro risulta utile nell'incrementare la conoscenza dei territori soggetti a sinkholes, e nel valutare le possibili relazioni esistenti tra questi e i fattori predisponenti ed innescanti. D'altra parte, la letteratura internazionale sempre più di frequente presenta lavori in tal senso (PARISE & LOLLINO, 2011; HERMOSILLA, 2012; ZHAO *et alii*, 2012). Il confronto tra aree come il Bacino dell'Ebro e la Penisola Salentina, geologicamente diverse ma con valori affini dei medesimi parametri morfometrici, offre l'occasione di discriminare il solo controllo strutturale nella genesi ed evoluzione degli sprofondamenti. Le aree esaminate nel presente lavoro certamente sono meritevoli di continua attenzione e approfondimenti su tali tematiche, anche per ciò che riguarda gli effetti derivanti da cavità scavate dall'uomo in epoche passate (DE PASCALIS *et alii*, 2010; PARISE, 2011; FIORE & PARISE, 2013).

BIBLIOGRAFIA

- ANELLI F. (1963) - *Fenomeni carsici, paracarsici e pseudocarsici*. Giornale di Geologia, **31**: 11-25.
- ANELLI F. (1964) - *Fenomeni paracarsici nei calcari grossolani terziari e quaternari delle Murge e del Salento in Puglia*. Atti III Int. Congr. Spel., Wien, **2**: 199-206.
- ARLEGUI L.E. (1996) - *Diaclasas, fallas y campos de esfuerzos en el sector central de la Cuenca del Ebro*. Tesi di Dottorato, Università di Zaragoza, pp. 308.
- ARLEGUI L.E. & SIMÓN J.L. (1993) - *El sistema de diaclasas N-S en el sector central de la cuenca del Ebro. Relación con el campo de esfuerzos neógeno*. Revista de la Sociedad Geológica de España, **6** (1-2): 115-122.
- ARLEGUI L.E. & SIMÓN J.L. (2000) - *Fracturación y campos de esfuerzos en el Cuaternario del sector central de la Cuenca del Ebro*. Cuaternario y Geomorfología, **14** (1-2): 11-20.
- ARLEGUI L.E. & SORIANO A. (1996) - *Lineamientos y su influencia en los modelados del centro de la cuenca del Ebro*. In: A. GRANDAL D'ANGLADE & J. PAGÉS VALCARLOS (Eds.), IV Reunión Nacional de Geomorfología, Cuadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe, **21**: 11-21.
- ARLEGUI L.E. & SORIANO M.A. (1998) - *Characterising lineaments from satellite images and field studies in the central Ebro basin (NE Spain)*. International Journal of Remote Sensing, **19**: 3169-3185.

- BECCARISI L., CACCIATORE G., CHIRIACÒ L., DELLE ROSE M., GIURI F., MARRAS V., QUARTA G., RESTA F. & SOLOMBRINO P. (2003) - *Le Vore di Barbarano: note descrittive e speleogenesi*. *Thalassia Salentina*, **26**: 145-154.
- BOSSIO A., MAZZEI R., MONTEFORTI B. & SALVATORINI G. (1987) - *Studi sul Neogene e Quaternario della Penisola Salentina: II. Evoluzione paleogeografica dell'area di Leuca nel contesto della dinamica mediterranea*. *Quad. Ric. Centro Studi Geol. Ing., Lecce*, **11**: 31-47.
- BOSSIO A., ESU D., FORESI L.M., GIROTTI O., IANNONE A., LUPERTO E., MARGIOTTA S., MAZZEI R., MONTEFORTI B., RICCHETTI G. & SALVATORINI G. (1998) - *Formazione di Galatone, nuovo nome per un'unità litostratigrafica del Salento (Puglia, Italia meridionale)*. *Atti Soc. Toscana Sc. Nat.*, **105**: 151-156.
- CIARANFI N., PIERI P. & RICCHETTI G. (1988) - *Note alla Carta Geologica delle Murge e del Salento (Puglia centro-meridionale)*. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **41** (1): 449-460.
- CLOSSON D. & ABOU KARAKI N. (2009) - *Human-induced geological hazards along the Dead Sea coast*. *Environmental Geology*, **58**: 371-380.
- CLOSSON D., LA MOREAUX P.E., ABOU KARAKI N. & AL-FUGHHA H. (2007) - *Karst system developed in salt layers of the Lisan Peninsula, Dead Sea, Jordan*. *Environmental Geology*, **52**: 155-172.
- COOPER A.H. (2002) - *Environmental problems caused by gypsum karst and salt karst in Great Britain*. *Carbonates and Evaporites*, **17**: 116-120.
- DE GIORGI C. (1896) - *Le vore di Barbarano*. *L'Universo*, **9**: 129-131.
- DELLE ROSE M., FEDERICO A. & PARISE M. (2004) - *Sinkhole genesis and evolution in Apulia, and their interrelations with the anthropogenic environment*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **4**: 747-755.
- DEL PRETE S., IOVINE G., PARISE M. & SANTO A. (2010) - *Origin and distribution of different types of sinkholes in the plain areas of Southern Italy*. *Geodinamica Acta*, **23** (1/3): 113-127.
- DE PASCALIS A., DE PASCALIS F. & PARISE M. (2010) - *Genesi ed evoluzione di un sinkhole connesso a cavità antropiche sotterranee nel distretto estrattivo di Cutrofiano (prov. Lecce, Puglia)*. *Atti 2° Workshop Int. "I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato"*, Roma, 3-4 dicembre 2009: 703-718.
- DE WAELE J., GUTIERREZ F., PARISE M. & PLAN L. (2011) - *Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review*. *Geomorphology*, **134** (1-2): 1-8.
- DOGLIONI C., MONGELLI F. & PIERI P. (1994) - *The Puglia uplift (SE-Italy): an anomaly in the foreland of the Apenninic subduction due to buckling of a thick continental lithosphere*. *Tectonics*, **13** (5): 1309-1321.
- FIGURE A. & PARISE M. (2013) - *Cronologia degli eventi di sprofondamento in Puglia, con particolare riferimento alle interazioni con l'ambiente antropizzato*. Presente volume.
- FORD D. & WILLIAMS P. (2007) - *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, pp. 562.
- GALVE J.P., GUTIÉRREZ F., LUCHA P., BONACHEA J., REMONDO J., CENDRERO A., GUTIÉRREZ M., GIMENO M.J., PARDO G. & SANCHEZ J.A. (2009) - *Sinkholes in the salt-bearing evaporite karst of the Ebro River valley upstream of Zaragoza city (NE Spain) Geomorphological mapping and analysis as a basis for risk management*. *Geomorphology*, **108**: 145-158.
- GARCIA-CASTELLANOS D., VERGÉS J., GASPAR-ESCRIBANO J. & CLOETINGH S. (2003) - *Interplay between tectonics, climate and fluvial transport during the Cenozoic evolution of the Ebro Basin (NE Iberia)*. *Journal of Geophysical Research*, **108** (B7): 2347.
- GUERRERO J., GUTIÉRREZ F. & LUCHA P. (2004) - *Paleosub-sidence and active subsidence due to evaporite dissolution in the Zaragoza area (Huerva River valley, NE Spain): processes, spatial distribution and protection measures for transport routes*. *Engineering Geology*, **72**: 309-329.
- GUTIÉRREZ F., ARAUZO T. & DESIR G. (1994) - *Deslizamientos en el escarpe en yesos de Alfajarín (Zaragoza)*. *Cuaternario y Geomorfología*, **8** (1-2): 57-68.
- GUTIÉRREZ F., GUTIÉRREZ M., MARÍN C., MALDONADO C. & YOUNGUER P.L. (2005) - *Subsidence hazard avoidance base don geomorphological mapping in the Ebro river valley mantled evaporite karst terrain (NE Spain)*. *Environmental Geology*, **48**: 370-383.
- GUTIÉRREZ F., GALVE J.P., GUERRERO J., LUCHA P., CENDRERO A., REMONDO J., BONACHEA J., GUTIÉRREZ M. & SANCHEZ J.A. (2007) - *The origin, typology, spatial distribution and detrimental effects of the sinkholes developed in the alluvial evaporite karst of the Ebro River valley downstream of Zaragoza City (NE Spain)*. *Earth Surface Processes and Landforms*, **32**: 912-928.
- GUTIÉRREZ F., CALAFORRA J.M., CARDONA F., ORTÍ F., DURÁN J.J. & GARAY P. (2008) - *Geological and environmental implications of evaporite karst in Spain*. *Environmental Geology*, **53**: 951-965.
- GUTIÉRREZ M., IBÁÑEZ M.J. & PEÑA J.L. (1985) - *Quelques exemples de karst sur gypse dans la Depression de l'Ebre*. *Karstologia*, **6**: 26-36.
- HANCOCK P.L. (1991) - *Determining contemporary stress directions from neotectonic joint systems*. *Phil. Trans. Roy. Soc. Londón*, **A, 337**: 29-40.
- HERMOSILLA R.G. (2012) - *The Guatemala City sinkhole collapse*. *Carbonates & Evaporites*, **23** (2): 103-107.
- JASSIM S.Z., JIBRIL A. & NUMAN N.M.S. (1997) - *Gypsum kaax-tification in the Middle Miocene Fatha Formation, Mosul area, northern Iraq*. *Geomorphology*, **18**: 137-149.
- LAMELAS M.T., MARINONI O., HOPPE A. & DE LA RIVA J. (2008) - *Doline probability map using logistic regression and GIS technology in the central Ebro Basin (Spain)*. *Environmental Geology*, **54**: 963-977.
- LAMONT-BLACK J., YOUNGER P.L., FORTH R.A., COOPER A.H. & BONNIFACE J.P. (2002) - *A decision-logic framework for investigating subsidence problems potentially attributable to gypsum karstification*. *Engineering Geology*, **65**: 205-215.
- LUZÓN M.A., PÉREZ A., SORIANO M.A. & POCOVÍ A. (2008) - *Sedimentary record of Pleistocene paleodoline evolution in the Ebro basin (NE Spain)*. *Sedimentary Geology*, **205**: 1-13.
- LUZÓN A., PÉREZ A., POCOVÍ A., SORIANO A., GIL H., RODRÍGUEZ-LÓPEZ J.P. & SIMÓN J.L. (2011) - *Sedimentary record related to the evolution of Quaternary dolines in the central Ebro Basin*. *Geo-Guías, 28th IAS Meeting of Sedimentology, Zaragoza*.

- MANCINI F., STECCHI F., ZANNI M. & GABBIANELLI G. (2009) - *Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla (Bosnia and Herzegovina)*. *Environmental Geology*, **58**: 381-389.
- MUÑOZ A., ARENAS C., GONZÁLEZ A., LUZÓN A., PARDO G., PÉREZ A. & VILLEN A. J. (2002) - *Ebro Basin (North-eastern Spain)*. In: W. GIBBONS & T. MORENO (Eds.), *The Geology of Spain*. Geological Society of London: 301-309.
- PALMENTOLA G. (1987) - *Lineamenti geologici e morfologici del Salento leccese*. *Quaderni Ricerche Centro Studi Geotecnica e di Ingegneria, Lecce*, **11**: 7-30.
- PARDO G., ARENAS C., GONZÁLEZ A., LUZÓN A., MUÑOZ A., PÉREZ A., PÉREZ-RIVARÉS F.J., VÁZQUEZ-URBEZ M. & VILLEN A. J. (2004) - *La Cuenca del Ebro*. In: J.A. VERA (Ed.) *Geología de España*. Sociedad Geológica de España-Instituto Geológico y Minero de España. Madrid: 533-543.
- PARISE M. (2008a) - *Elementi di geomorfologia carsica della Puglia*. In: M. PARISE, S. INGUSCIO & A. MARANGELLA (a cura di), *Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello di "Geomorfologia Carsica"*. Grottaglie, 2-3 febbraio 2008: 93-118.
- PARISE M. (2008b) - *I sinkholes in Puglia*. In: S. NISIO (a cura di) *"I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane"*. *Mem. Descr. Carta Geol. d'It.*, **85**: 309-334.
- PARISE M. (2010) - *Hazards in karst*. In: O. BONACCI (Ed.) *"Sustainability of the karst environment. Dinaric karst and other karst regions"*. IHP-UNESCO, Series on Groundwater no. 2: 155-162.
- PARISE M. (2011) - *Alcune considerazioni sulle cave sotterranee in Puglia e sulle relative problematiche*. *Opera Ipogea*, **1/2**: 221-228.
- PARISE M. & GUNN J. (Eds.) (2007) - *Natural and anthropogenic hazards in karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation*, pp. 202. Geological Society, London, Special Publ. 279.
- PARISE M. & LOLLINO P. (2011) - *A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy*. *Geomorphology*, **134** (1-2): 132-143.
- PARISE M., FEDERICO A., DELLE ROSE M. & SAMMARCO M. (2003) - *Karst terminology in Apulia (southern Italy)*. *Acta Carsologica*, **32** (2): 65-82.
- PAUKŠTYS B. & COOPER A.H. (1999) - *Planning for gypsum geohazards in Lithuania and England*. *Engineering Geology*, **52**: 93-103.
- PEPE M. & PARISE M. (2011) - *Structural control in sinkhole development: the case study of Barbarano del Capo (Salento peninsula, Apulia region, South-East Italy)*. *Proc. 1st Int. Workshop "Methods and Technologies for Environmental Monitoring and Modelling: Landslides and Ground Water Dynamics"*, Potenza, 29 September – 3 October 2011: 153-157.
- SALVATI R. & SASOWSKY I.D. (2002) - *Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge*. *Journal of Hydrology*, **264**: 1-11.
- SAMMARCO M. & PARISE M. (2008) - *Cavità artificiali per uno studio di storia salentina: il caso dell'ipogeo di Leuca Piccola a Barbarano (Lecce)*. *Atti XX Congr. Naz. Speleologia, Iglesias, Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. II*, **21**: 546-550.
- SIMÓN J.L. (1986) - *Analysis of a gradual change in stress regime (example from the Eastern Iberian Chain, Spain)*. *Tectonophysics*, **124**: 37-53.
- SIMÓN J.L. & SORIANO M.A. (1985) - *Deformaciones cuaternarias en el área de Zaragoza*. *Atti I Reunión Cuaternario Ibérico*: 329-343.
- SIMÓN J.L., SORIANO M.A., GRACIAS J. & SALVADOR T. (1991) - *Dolinas aluviales en las terrazas del Ebro al oeste de Zaragoza: un análisis empírico de los factores de riesgo*. *Cuaternario y Geomorfología*, **5**: 139-148.
- SIMÓN J.L., MARTÍNEZ-GIL F.J., SORIANO M.A., ARLEGUÍ L.E. & CABALLERO J. (1998) - *Plan General de Ordenación Urbana. Anejo 3. Estudios Geológicos-Geotécnicos*. Ayuntamiento de Zaragoza. <http://www.zaragoza.es/ciudad/urbanismo/planeamiento/pgouz/memoria.htm>.
- SIMÓN J.L., SORIANO M.A., ARLEGUÍ L., GRACIA J., LIESA C.L. & POCOVÍ A. (2008) - *Spacetime distribution of ancient and active alluvial karst subsidence: examples from the central Ebro Basin, Spain*. *Environmental Geology*, **53**: 1057-1065.
- SORIANO M.A. (1986) - *Dolinas de disolución normal y dolinas aluviales en el sector Centro-Meridional de la Depresión del Ebro*. *Boletín Geológico y Minero*, **97**: 328-337.
- SORIANO M.A. (1990) - *Geomorfología del sector centromeridional de la Depresión del Ebro*. *Institución Fernando el Católico*, pp. 269.
- SORIANO M.A. (1992) - *Characteristics of the alluvial dolines developed of gypsum dissolution in the central Ebro Basin*. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd.* **85**: 59-72.
- SORIANO M.A. & SIMÓN J.L. (1995) - *Alluvial dolines in the central Ebro Basin, Spain: a spatial and developmental hazard analysis*. *Geomorphology*, **11**: 295-309.
- SORIANO M.A., LUZÓN A., PÉREZ A., POCOVÍ A., SIMÓN J.L. & GIL H. (2010) - *Past and present doline development in the central Ebro Basin (NE Spain)*. 2° Workshop internazionale "I Sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", ISPRA: 359-370.
- SORIANO M.A., LUZÓN A., PÉREZ A., YUSTE A., POCOVÍ A., SIMÓN J.L. & GIL H. (2012) - *Quaternary alluvial sinkholes: Record of environmental conditions of karst development. Examples from the Ebro Basin, Spain*. *Journal of Cave and Karst Studies*, **72**: 173-185.
- TOZZI M. (1993) - *Assetto tettonico dell'Avampaese Apulo meridionale (Murge meridionali-Salento) sulla base dei dati strutturali*. *Geologica Romana*, **29**: 95-111.
- VAN ZUIDAM R.A. (1976) - *Geomorphological development of the Zaragoza region, Spain. Processes and landforms related to climatic changes in a large Mediterranean river basin*. *Int. Inst. for Aerial Survey and Earth Sciences, Enschede*, pp. 221.
- WHITE W.B. (1988) - *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. Oxford University Press, New York, pp. 464.
- YAORU L. & COOPER A.H. (1997) - *Gypsum karst geohazards in China*. In: F.B. BECK & J.B. STEPHENSON (Eds.), *"The Engineering Geology and Hydrogeology of Karst Terranes"*: 117-126.
- YILMAZ I.Y. (2007) - *GIS based susceptibility mapping of karst depression in gypsum: A case study from Sivas basin (Turkey)*. *Engineering Geology*, **90**: 89-103.
- ZHAO H., MA F. & GUO J. (2012) - *Regularity and formation mechanism of large-scale abrupt karst collapse in southern China in the first half of 2010*. *Natural Hazards*, **60**: 1037-1054.
- ZHOU W. & BECK B.F. (2008) - *Management and mitigation of sinkholes on karst lands: an overview of practical applications*. *Environmental Geology*, **55**: 837-851.
- ZHOU W. & BECK B.F. (2011) - *Engineering issues in karst*. In: P. VAN BEYNEN (Ed.), *"Karst Management"*. Springer: 9-45.