

January 2007

I Sinkholes nella Letteratura Scientifica Internazionale: una Breve Rassegna, con Particolare Riferimento Agli Stati Uniti D'America

Lee J. Florea

Western Kentucky University, lflorea@bsu.edu

Mario Parise

Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica

Follow this and additional works at: http://digitalcommons.wku.edu/geog_fac_pub

 Part of the [Environmental Monitoring Commons](#), [Geology Commons](#), [Geophysics and Seismology Commons](#), and the [Natural Resources and Conservation Commons](#)

Recommended Repository Citation

Florea, Lee J. and Parise, Mario. (2007). I Sinkholes nella Letteratura Scientifica Internazionale: una Breve Rassegna, con Particolare Riferimento Agli Stati Uniti D'America. *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*.

Available at: http://digitalcommons.wku.edu/geog_fac_pub/15



APAT

Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici
DIPARTIMENTO DIFESA DEL SUOLO
Servizio Geologico d'Italia
Organo Cartografico dello Stato (legge n° 68 del 2.2.1960)

MEMORIE

DESCRITTIVE DELLA

CARTA GEOLOGICA D'ITALIA

VOLUME LXX

**I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree
di pianura italiane**

*The natural phenomena of sinkhole in the Italian
plain areas*

di

Editor

Direttore responsabile : Leonello SERVA

Redazione a cura del Servizio Cartografico, Coordinamento di Base e Tavoli Europei

Dirigente: Norman Accardi

Capo Settore: Domenico Tacchia

Coordinatore Editoriale: Domenico Tacchia

Allestimento testi: Massimiliano Ronsisvalle

Stampatore - Italia 2007

I SINKHOLES NELLA LETTERATURA SCIENTIFICA INTERNAZIONALE: UNA BREVE RASSEGNA, CON PARTICOLARE RIFERIMENTO AGLI STATI UNITI D'AMERICA

Mario Parise¹, Lee J. Florea²

¹CNR, Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Bari; m.parise@ba.irpi.cnr.it

²United States Geological Survey, Ft. Lauderdale, Florida, USA; lflorea@usgs.gov

INTRODUZIONE

Fenomeni di sinkholes sono diffusi in moltissimi paesi del mondo, in ambiti geologici e morfologici alquanto differenziati, e coinvolgono svariate litologie, sia nelle successioni di copertura che in quelle direttamente affioranti alla superficie. Il presente contributo intende fornire una breve rassegna, certamente non esaustiva, sullo stato dell'arte delle ricerche relative ai sinkholes in ambito internazionale. Esso consiste in una descrizione della più aggiornata e diffusa classificazione dei sinkholes e, a seguire, in descrizioni delle più tipiche casistiche di sinkholes nei vari paesi. Tra questi, viene dato particolare risalto agli Stati Uniti d'America (e, più in particolare, alla Florida), dove le ricerche su tali fenomeni sono state avviate da tempo e risultano estremamente approfondite.

CLASSIFICAZIONE DEI SINKHOLES

Il termine sinkhole è definito dal Glossario di Geologia come “una depressione circolare in area carsica. Presenta drenaggio sotterraneo, dimensioni tra i metri e le decine di metri, ed è generalmente a forma di imbuto” (BATES & JACKSON, 1987, pag. 616). Nonostante la semplicità della definizione riportata, derivante parzialmente da lavori precedenti (FAIRBRIDGE, 1968; MONROE,

1970), il termine sinkhole è stato frequentemente utilizzato anche per indicare sprofondamenti connessi ad attività antropiche, o che non si verificavano in ambiente carsico. La confusione terminologica è stata notevole, anche favorita dall'utilizzo del termine sinkhole negli Stati Uniti (BECK, 2005), di contro a una più frequente diffusione del sinonimo dolina, maggiormente utilizzato per descrizioni geomorfologiche, in ambito europeo. Quest'ultimo termine, derivante dalla lingua slava, con significato di valle (ma, più in generale, di una qualunque depressione del paesaggio carsico; CVIJIC, 1893; GAMS, 1973, 2000) indica la forma probabilmente più nota del carso epigeo; dolina e sinkhole possono essere quindi utilizzati per descrivere le stesse forme, con il primo termine per analisi di carattere geomorfologico, mentre il secondo si presta maggiormente a descrizioni ingegneristico-tecniche, come evidenziato da WILLIAMS (2003) e da SAURO (2003).

Per le finalità del presente volume, che si concentra sui fenomeni di sinkholes in aree di pianura alluvionale, si farà riferimento in questo contributo a casi di sprofondamento oggetto di studio essenzialmente (ma non solo) nel campo della geologia applicata, escludendo (o limitando fortemente) l'analisi di carattere esclusivamente geomorfologico.

La più recente e completa classificazione dei sinkholes è quella proposta da WALTHAM *et alii*

(2005) che a sua volta deriva da lavori precedenti degli stessi autori (in particolare, da WALTHAM & FOOKES, 2003). Essa suddivide i fenomeni di sinkholes in sei tipologie (Fig. 1):

- sinkhole da dissoluzione;
- sinkhole da crollo;
- sinkhole della copertura;
- sinkhole da “richiamo”;
- sinkhole da suffosione;
- sinkhole sepolto.

Sinkholes da dissoluzione (*solution sinkholes*): sono originati per dissoluzione della roccia solubile in ambiente carsico da parte dell’acqua di ruscellamento superficiale. Risultano estremamente diffusi sui territori carsici (sia in rocce carbonatiche che evaporitiche), specialmente nei casi in cui il substrato è affiorante o sub-affiorante. Tipologie carsiche appartenenti a questa categoria si osservano in svariati contesti morfologici, dalle aree di altopiano o di dorsale, al carso di montagna, a quello costiero e di pianura, ecc. Talora, pur essendo presente un esiguo spessore del materiale di copertura o di depositi residuali del processo carsico (terre rosse), si formano ugualmente sinkhole da dissoluzione.

Il processo di formazione risulta estremamente lento, ragion per cui in genere i sinkholes da dissoluzione non pongono problemi particolari all’ambiente antropizzato, costituendo semplice-

mente i punti preferenziali di infiltrazione del ruscellamento superficiale. Le dimensioni variano da pochi metri sino a sinkholes molto ampi, anche di un chilometro di ampiezza e 100 metri di profondità.

Sinkholes da crollo (*collapse sinkholes*): si formano a causa della presenza di una cavità carsica sotterranea, la cui evoluzione procede dal basso verso l’alto per progressivo assottigliamento del diaframma roccioso, fino al raggiungimento della superficie topografica, ed alla conseguente apertura di una voragine. Il processo, che può durare per tempi estremamente lunghi, presenta altresì una fase catastrofica finale (quella appunto del collasso) estremamente rapida, che si verifica nel giro di secondi, o al massimo minuti, e che raramente mostra segni premonitori. Queste caratteristiche fanno sì che i sinkholes da crollo siano quelli a maggiore pericolosità per l’ambiente antropizzato, e che spesso determinino gravi danni economici o addirittura vittime.

La forma del sinkhole è generalmente a pareti verticali o sub-verticali, ma frequente è anche il caso di formazione di uno sprofondamento con pareti a profilo tronco-conico, e con la parte superiore costituita da rocce a mensola, prive di supporto nella porzione più esterna. Con il tempo, a causa di crolli successivi e dell’arrivo eventuale di materiale dall’esterno, la forma può variare, e le pareti

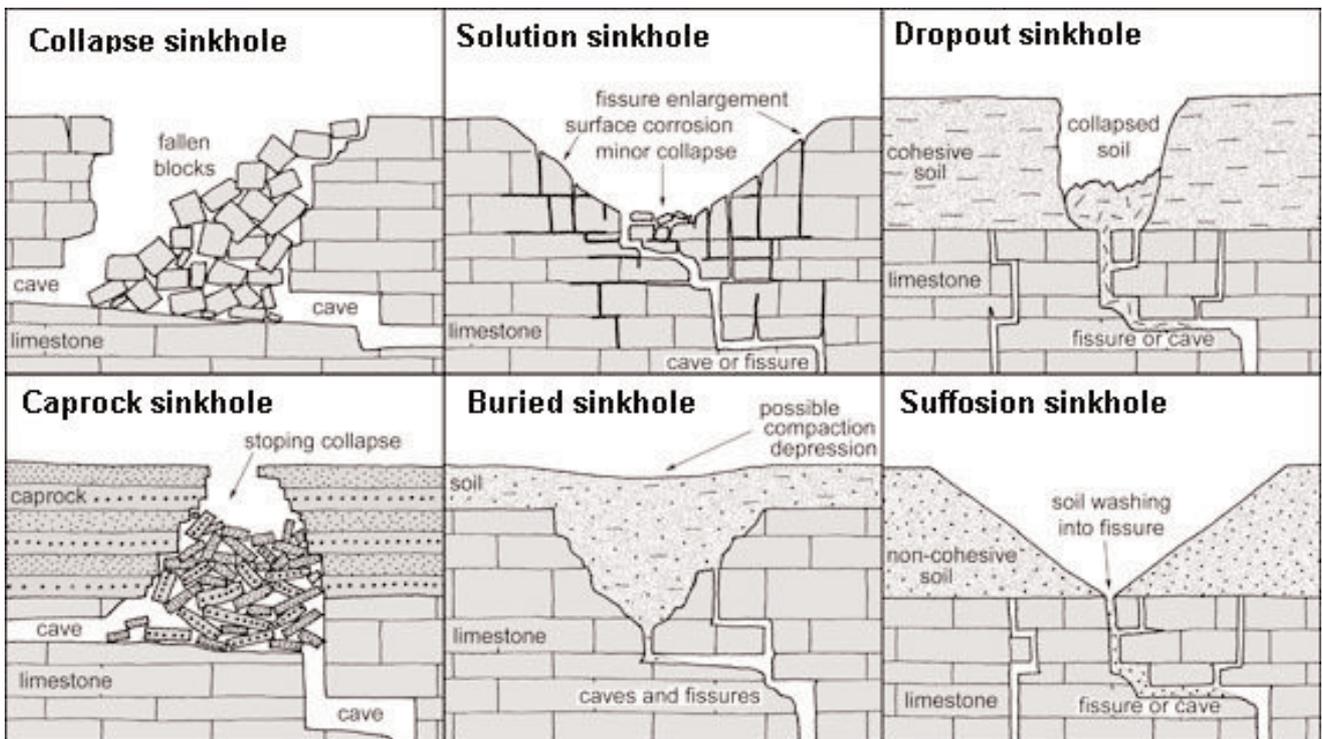


Fig 1. Classificazione dei sinkholes (da WALTHAM et al., 2005). - Classification of sinkholes (after WALTHAM et al., 2005).

assumere un profilo a minore pendenza. Le dimensioni classiche variano da pochi metri fino a un massimo di qualche centinaio di metri in larghezza e poco più di 100 metri in profondità.

Strettamente connessi alla tipologia precedente sono i sinkholes per crollo della copertura (*caprock sinkholes*): anche qui la voragine si forma a causa della presenza di una originaria cavità carsica e del progressivo spostamento del suo tetto verso l'alto. In questo caso però, al di sopra del substrato carsificabile è presente una copertura di rocce insolubili, il cui spessore può variare da pochi metri a decine di metri. La voragine presenta forma cilindrica o tronco-conica. Come nel caso precedente, il crollo finale può avere gravi conseguenze per l'ambiente antropizzato.

Sinkholes da “richiamo” (*dropout sinkholes*): si formano a causa del crollo di una cavità formata nella copertura di materiale coesivo al di sopra di un substrato carsificabile. La fase finale del crollo può durare pochi minuti, ma è preceduta da una lunga evoluzione del vuoto all'interno del materiale di copertura. Le dimensioni sono in genere minori rispetto ai casi precedenti, variando fino a 50 metri in diametro e 10 metri in profondità.

Nel caso in cui la copertura sia invece costituita da materiali non coesivi (sabbie sciolte, ghiaie, ecc.), si verifica un richiamo più o meno lento e continuo del materiale di copertura, generalmente al di sopra o in corrispondenza di fratture o condotti presenti nel substrato. Il processo è più lento e graduale, e determina la formazione della quinta tipologia di sinkholes, vale a dire il **sinkhole per suffosione** (*suffosion sinkhole*). Il propagarsi del fenomeno agli strati superficiali della copertura determina il formarsi di un avvallamento della superficie topografica. Le dimensioni sono analoghe a quelle del sinkhole da richiamo.

Queste due categorie di sinkholes producono la maggior parte dei problemi di carattere ingegneristico, con moltissimi casi di danni ad abitazioni, strade o infrastrutture antropiche. Il processo fondamentale nella loro genesi consiste nel drenaggio e nell'erosione che procede dal basso verso l'alto. Di frequente essi risultano quindi causati da qualche attività antropica, che determina una variazione nel drenaggio naturale delle acque sotterranee, e induce il processo di formazione di sinkhole.

I sinkholes da suffosione e quelli da richiamo rientrano, in altre classificazioni, sotto la voce sinkholes da subsidenza, a causa della lenta evoluzione dei fenomeni.

Sinkholes sepolti (*buried sinkholes*): si tratta di

depressioni nel substrato carsificabile, colmate del tutto o in parte da materiali di copertura, depositi anche a seguito di variazioni ambientali. La maggior parte presenta un'origine come sinkhole da dissoluzione, con o senza modifiche successive a causa di crolli. Le dimensioni sono estremamente varie, da 1 metro a 100 metri in diametro, con versanti molto blandi o acclivi. Questo tipo di sinkholes pone problemi ingegneristici a causa della presenza di terreni soffici o poco cementati al di sopra di un substrato frequentemente a morfologia accidentata; casi di assestamenti differenziali, o di compattazione locale dei materiali, possono risultare frequenti.

Per quanto riguarda la interazione esistente tra le attività antropiche e i sinkholes, va detto che l'uomo può intervenire producendo notevoli variazioni su un ambiente di estrema vulnerabilità quale quello carsico, tra i più fragili del nostro pianeta, e provocare elevato degrado, sia in superficie che nel sottosuolo (PARISE & PASCALI, 2003; PARISE & GUNN, 2007). Tra l'altro, vi sono numerose attività antropiche che possono favorire, se non causare, la formazione di sinkholes: variazioni nel drenaggio sotterraneo, sovraccarico su cavità naturali e/o artificiali, scavi in sotterraneo, vibrazioni connesse a traffico o attività di altro tipo, ecc. L'uomo può quindi, da un lato essere “vittima” dei sinkholes, sia in termini economici che con perdita di vite umane, e dall'altro agire favorendo o addirittura innescando i processi stessi. Ogni qualvolta il ruolo svolto dall'uomo risulta chiaramente imputabile tra le cause che hanno determinato un sinkhole, sarà possibile parlare di sinkhole indotto da attività antropiche. Il processo genetico, che conduce alla formazione vera e propria del sinkhole, può in ogni caso essere ricondotto ad una delle sei tipologie definite da WALTHAM *et alii* (2005) e descritte in precedenza.

STATI UNITI D'AMERICA

Negli Stati Uniti risultano frequenti gli sprofondamenti superficiali connessi al collasso di miniere sotterranee (e.g. KAPPEL *et alii*, 1999). Si stima che il 20% dei casi di subsidenza sia associato ad attività di estrazione mineraria (GALLOWAY *et alii*, 1999). Uno dei casi meno noti di questo tipo, seppur di grande interesse, è il collasso dell'11 ottobre del 2000 a Inez, Kentucky, allorché l'apertura di una breccia all'interno di una miniera sotterranea in un bacino di residui liquidi del ciclo di produzione del carbone rilasciò nell'arco di poche ore circa 1.1 milioni di metri cubi di fanghi tossi-



Fig. 2. Fanghiglia solidificata di carbone presso Inez, Kentucky, USA. Nell'ottobre del 2001, l'apertura di una breccia all'interno di una miniera sotterranea in un bacino di residui liquidi del ciclo di produzione del carbone rilasciò un quantitativo stimato in 1.1 milioni di metri cubi di fango tossico. - *Solidified coal slurry near Inez, Kentucky, USA. A breach into an underground coal mine from a reservoir of thick liquid waste from coal processing released an estimated 1.1 million cubic meters of toxic slurry in October of 2001.*

ci in fiumi e torrenti (Fig. 2). In un altro drammatico esempio, verificatosi nel giugno 1994 nella Florida centrale, un collasso in un accumulo di depositi di gesso, sottoprodotto di miniere di fosfati, determinò la formazione di un cratere



Fig. 3. Sinkhole profondo 140 metri, apertosi in un deposito di gesso il 15 Giugno 1994 nella Florida centrale. La voragine così prodotta ha scaricato più di 100,000 m³ di gesso e acque tossiche e radioattive all'interno dell'acquifero della Florida, che fornisce il 90 % dell'acqua potabile dello stato. Si noti l'elicottero nella foto, per scala (foto da US News & World Report, 12 Giugno 1995). - *A 140-m deep sinkhole that opened in a gypsum stack on June 15, 1994 in Central Florida. The sinkhole cave-in dumped more than 100,000 m³ of toxic and radioactive gypsum and waste water into the Floridan Aquifer, which provides 90 percent of the state's drinking water. Note the helicopter in the image (photograph from US News & World Report, June 12, 1995).*

profondo 140 metri e ampio 70 m, che riversò più di 100.000 m³ di rifiuti leggermente radioattivi nell'acquifero della Florida (Fig. 3). L'esempio più spettacolare è probabilmente quello di New Iberia, in Louisiana, dove una perforazione per ricerca di idrocarburi al di sotto del Lago Peigneur penetrò una miniera di sale il 21 novembre 1980 a una profondità di 375 m. In tre ore, i 13.3 milioni di m³ di acqua dolce del lago scomparvero nel sottosuolo in corrispondenza di un vortice di 400 m di diametro. Acqua salata proveniente dal Golfo del Messico si precipitò nel lago creando una cascata alta 46 m nel cratere dove una volta si trovavano le attrezzature di perforazione.

Questo tipo di collassi, connessi ad attività mineraria o estrattiva, desta l'interesse dell'opinione pubblica e provoca significativi danni in termini economici. Tuttavia, sono i fenomeni di subsidenza o di collasso in aree carsiche che costituiscono la maggior parte dei sinkholes. Sebbene i sinkholes siano un fenomeno naturale in territori carsici, il loro sviluppo è chiaramente favorito da cambiamenti nell'uso del suolo, riduzione nello spessore del diaframma roccioso sovrastante cavità naturali, sovraccarichi nel corso di operazioni di costruzione, variazioni nel deflusso idrico superficiale e sotterraneo.

Negli Stati Uniti d'America si registra un grande potenziale per il verificarsi di sinkholes in ambienti carsici; più del 40% del territorio ad est del fiume Mississippi è costituito da calcari carsificati. Di particolare interesse è lo stato della Florida, dove si è avuto un aumento della popolazione dai 3 milioni del 1950 ai più di 17 milioni di oggi. Grotte carsiche abbondano nei calcari di questo stato in rapida evoluzione urbanistica. Ad esempio, WILLIAM WILSON, dipendente del *Florida Sinkhole Research Institute* durante gli anni 80, stimò che l'acquifero della Florida contiene 2.9 x 10⁶ m³/km² di grotte (WILSON, 1988). Una più recente ricerca sulle cavità naturali

nella Florida centro-occidentale (FLOREA, 2006) ha confermato come le grotte risultino estremamente diffuse, svolgendo altresì un ruolo critico all'interno dell'acquifero della Florida, per quanto riguarda la distribuzione dei sinkholes.

I SINKHOLES DELLA FLORIDA

In Florida, il termine sinkhole risulta ormai associato a una definizione di carattere legislativo:

...una forma del paesaggio creata da subsidenza di suolo, sedimento o roccia allorché gli strati sottostanti sono soggetti a dissoluzione ad opera delle acque sotterranee. Un sinkhole si può formare per collasso in vuoti sotterranei creati dalla dissoluzione di calcare o dolomie o per fenomeni di subsidenza quando questi strati vengono disciolti (legge della Florida 627.706).

Tale definizione legale di sinkhole stabilita dalla legislazione della Florida ha determinato una copertura assicurativa obbligatoria riguardo ai sinkholes per tutte le abitazioni dello Stato. La Florida è il solo stato negli USA a richiedere questa copertura assicurativa.

Collapsi catastrofici avvenuti nel passato in Florida hanno spinto alla redazione di appositi atti legislativi concernenti i sinkholes. In quello che probabilmente è l'esempio più famoso, il sinkhole di Winter Park, un intero isolato della città di Orlando scomparve in una voragine nel 1981, con la distruzione di una concessionaria di automobili e una piscina pubblica (Fig. 4).

Il sinkhole di Winter Park, al pari di altri simili collassi catastrofici, costituisce una delle due categorie principali di sinkholes connessi a carsismo in Florida: collassi dei depositi di copertura, e subsidenza dei depositi di copertura (SINCLAIR *et alii*, 1985; TIHANSKY, 1999; BROOKS *et alii*, 2006). Il numero e la tipologia di sinkholes in Florida dipende dallo spessore delle sabbie e argille di copertura che si sono deposte nel corso degli ultimi 25 milioni di anni. Questi depositi geologicamente recenti coprono gran parte del territorio dello stato e i calcari in cui si sviluppano le grotte. Allorché lo spessore di sabbia ed argilla risulta più potente, e l'acquifero di conseguenza confinato, come avviene in alcuni settori della Florida setten-

trionale e meridionale, lo sviluppo di grotte e più in generale del processo carsico è limitato. Se invece lo spessore è ridotto, come nella Florida centro-occidentale, il risultato è un terreno interessato da quel tipo di carsismo che va sotto la definizione di carso coperto (*mantled karst*, SINCLAIR *et alii*, 1985; UPCHURCH & RANDAZZO, 1997; TIHANSKY, 1999).

I sinkholes per subsidenza dei depositi di copertura si formano quando sedimenti superficiali ricchi in sabbia si infiltrano nelle sottostanti cavità al pari della sabbia in una clessidra, dando gradualmente origine ad una depressione in superficie. Sinkholes per collasso della copertura si formano invece quando i sedimenti superficiali contengono grandi quantitativi di argilla, che costituisce il legante del suolo, in modo tale da creare dei ponti di terra in grado di sostenere piccole cavità, ma non quelle di maggiori dimensioni. Sprofondamenti all'interno delle cavità di maggiori dimensioni, come nel caso di Winter Park, possono essere improvvisi se non catastrofici, inghiottendo tutto ciò che insiste sulla superficie nel giro di pochi minuti. Si consideri, ad esempio, questo estratto del bollettino della *National Water Well Association*, in occasione del Guest sinkhole del 1975 (BOATWRIGHT & ALLMAN, 1979):

Un enorme sinkhole si è aperto in un sito oggetto di perforazione presso Tampa, in Florida, inghiottendo la struttura di sostegno alla perforazione, un'autobotte per il trasporto dell'acqua e un rimorchio contenente tubazioni di



Fig. 4. Il sinkhole a Winter Park, Florida, presso Orlando che si formò catastroficamente in un giorno nel 1981 (foto: United States Geological Survey). - Sinkhole at Winter Park, Florida near Orlando that formed catastrophically in one day in 1981 (United States Geological Survey photo).

perforazione, per un valore complessivo di 100,000 \$. Si era raggiunta con la perforazione la profondità di 61 m allorché il terreno ha iniziato a lasciare spazio a ciò che si è rilevata essere una grotta in calcare. Nell'arco di 10 minuti tutte le attrezzature sono scomparse alla vista, all'interno di un cratere profondo 90 m e largo altrettanto.

Sebbene i sinkholes per collasso della copertura siano drammatici e di frequente devastanti, gli effetti cumulativi dei sinkholes per subsidenza della copertura rappresentano un enorme rischio economico per urbanisti, pianificatori del territorio, singoli proprietari terrieri e di case, compagnie assicurative (SCHEIDT *et alii*, 2005). I sedimenti superficiali spesso mascherano la presenza di cavità sotterranee. Ad esempio, una porzione di terreno del campus universitario della University of South Florida a Tampa è stata approfonditamente esaminata, col risultato che la densità di possibili cavità è risultata nell'ordine di una per

ogni 625 m² (25 x 25 m) di superficie (PARKER, 1992). Ciò si traduce in approssimativamente 256 probabili sinkholes per questa porzione di terreno paragonabile per estensione ad un isolato in una città, ma soltanto due sinkholes sono realmente visibili in superficie. Inoltre, molti sinkholes esistenti risultano attualmente mascherati a causa della recente urbanizzazione. Nella Contea Pinellas, ad esempio (Fig. 5), si stima che l'87% delle depressioni identificate sulle fotografie aeree del 1926 risultò coperto o mascherato nel 1995 (BRINKMANN *et alii*, 2007).

A causa del linguaggio non preciso espresso dalla legislazione della Florida, nonché delle intrinseche difficoltà nel percepire le reali cause dei fenomeni di subsidenza, l'opinione pubblica e i media attribuiscono un'origine geologica anche a casi di subsidenza derivanti da cause di natura antropica. Risulta ad esempio particolarmente frequente l'apertura di voragini a causa di rotture delle tuba-

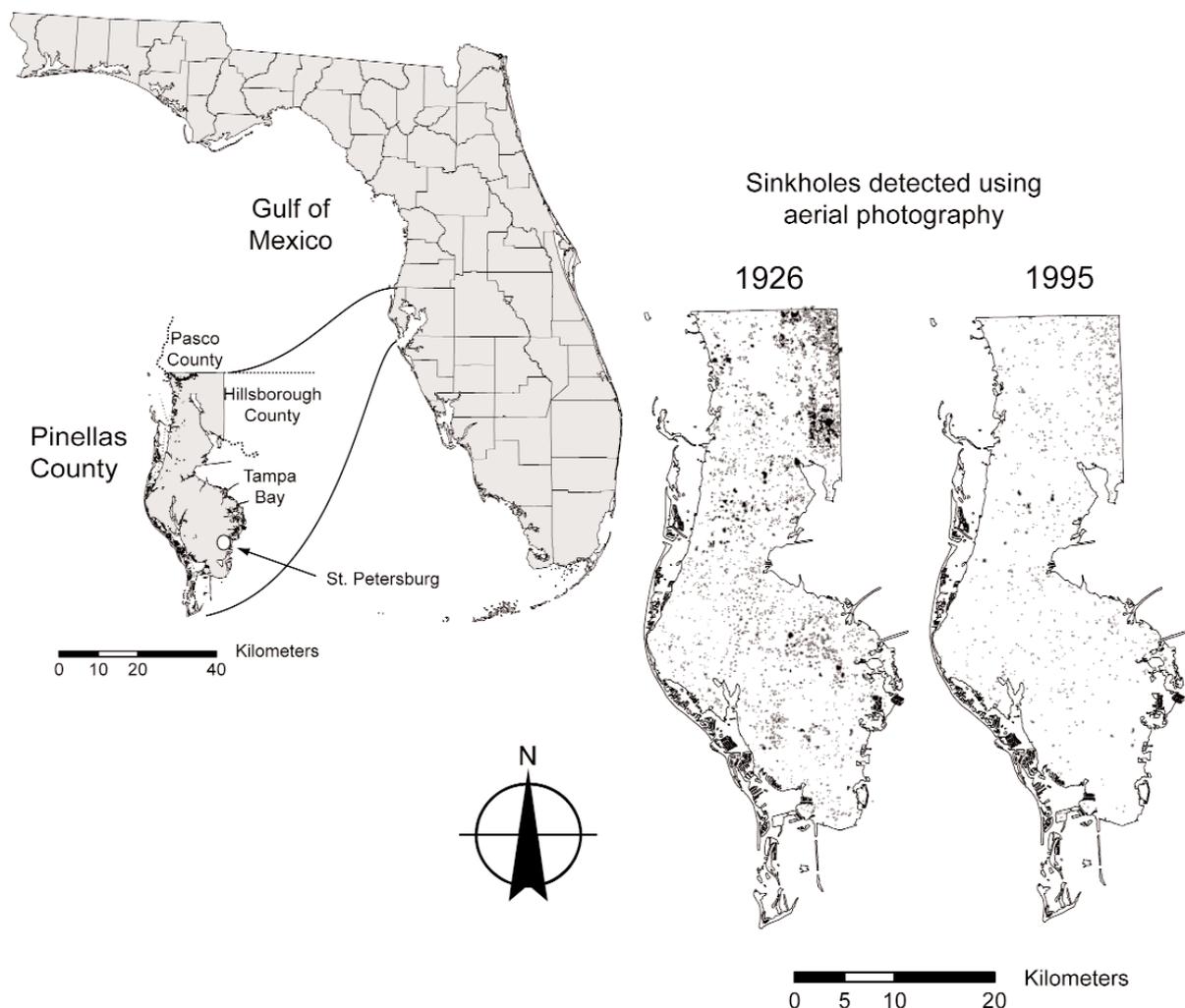


Fig. 5. Distribuzione dei sinkholes nella Contea Pinellas, Florida, USA. Le carte del 1926 e del 1995 riportano l'ubicazione dei sinkholes dedotta da interpretazione delle fotografie aeree (da BRINKMANN *et alii*, 2007). - The distribution of sinkholes in Pinellas County, Florida, USA. The 1926 and 1995 maps indicate sinkholes located using aerial photography (after BRINKMANN *et alii*, 2007).

zioni idriche o per il collasso di vetusti sistemi di fognatura. Ulteriori sinkholes possono essere prodotti ad opera della scarsa qualità nelle tecniche di costruzione in aree urbane (ossidazione di sostanza organica sepolta, restringimento di argille montmorillonitiche).

Sinkholes e altri simili fenomeni di subsidenza hanno provocato più di 100 milioni di dollari in danni strutturali in Florida nel corso del 1997, e le stime dei danni sono in progressivo aumento, in parte a causa della crescita di popolazione e dell'urbanizzazione. Nel 2006, molti proprietari di case hanno visto triplicare la propria assicurazione per l'immobile, con proiezioni di ulteriori aumenti. Molte assicurazioni hanno cessato la stipula di polizze sulle case nello stato, costringendo numerosi cittadini all'unica possibilità alternativa, consistente in assicurazioni su fondi statali, a ben più alto rischio. Le richieste di rimborso per danni da sinkholes alla *Citizen's Insurance* sono aumentate da 9 nel 2002 a 632 nel 2005. I dati relativi alla prima metà del 2006 indicano inoltre che sono già pervenute 432 richieste (FLORIDA OFFICE OF INSURANCE REGULATION, 2006). A ulteriore conferma di questo andamento, va segnalata la crescita nel numero di società di ingegneria, esclusivamente create per la valutazione dei danni derivanti da sinkholes. Inoltre, si registra anche un notevole aumento nel numero di studi legali specializzati in cause riguardanti sinkholes (Fig. 6). Il danno diretto a proprietà private derivante da tali fenomeni determina quindi un alto livello di interesse, sia governativo che pubblico, in Florida sui processi di sinkholes.

Allorquando il proprietario di una casa riconosce danni strutturali all'immobile, o alla sua proprietà, e ritiene che essi siano determinati da sinkholes, egli può procedere ad intentare una causa assicurativa per esigere la riparazione dei danni e la stabilizzazione del terreno. Va però detto che bisogna avere le prove che il problema sia stato causato dalle locali caratteristiche del sottosuolo geologico e non sia addebitabile a causa antropiche. Prima del 2005 non era stata stabilita alcuna metodologia finalizzata alla raccolta di tali evidenze.

Una riscrittura della legge della Florida sui sinkholes avvenuta quell'anno ha specificato che le indagini geofisiche costituiscono una delle necessarie prove in questione (DOBECKI & UPCHURCH, 2006). Nel caso di drammatici sin-

kholes per collasso della copertura, le indagini geofisiche sono semplici e la causa connessa a processi carsici risulta sufficientemente ovvia. D'altra parte, la grande maggioranza dei danni è causata da lenti assestamenti del terreno a causa dell'infiltrazione di sabbia all'interno di sinkholes per subsidenza della copertura. In questi casi, il movimento del terreno risulta spesso impercettibile e i danni derivanti si manifestano sotto forma di crepe nei muri e nelle fondamenta, porte che non si chiudono, o anche pavimenti non più perfettamente orizzontali. Ai fini di una più definitiva determinazione nei casi di subsidenza della copertura, viene richiesto un dettagliato lavoro in situ, che deve necessariamente comprendere indagini geofisiche. Tra queste, si utilizzano in particolare le tecniche di sismica superficiale, di resistività elettrica (DOBECKI & UPCHURCH, 2006), e il georadar (KRUSE *et alii*, 2006).

ALTRI EVENTI DI SINKHOLES NEGLI USA

Oltre alla Florida, sono molte le aree degli Stati Uniti d'America interessate da sinkholes, ed esiste una vasta letteratura in merito, principalmente alimentata dalle dieci "Conferenze Multidisciplinari sui Sinkholes e l'Impatto Ingegneristico e Ambientale del Carso", organizzate da BARRY BECK a partire dal 1984. Negli atti di tali conferenze (ai quali si rimanda per più specifici e dettagliati approfondimenti; si vedano ad esempio BECK, 1999 e 2002), grande attenzione è rivolta ai sinkholes di natura antropica, che indubbiamente hanno provocato alcune tra le situazioni più eclatanti negli USA.



Figura 6. Cartellone pubblicitario lungo una strada di Tampa, Florida. - Advertising board along a road at Tampa, Florida.

Emblematici in tal senso i casi riportati da JOHNSON (2005a) di sinkholes nella zona di Wink in Texas, in un'area intensamente interessata da estrazione di petrolio (campo petrolifero iniziato nel 1926). Due enormi sinkholes, di diametro superiore ai 110 m, si sono formati rispettivamente nel 1980 e 2002, a causa della progressiva migrazione verso l'alto di una cavità per dissoluzione all'interno dei depositi di sale della Salado Formation, a profondità comprese tra 400 e 660 m al di sotto del piano campagna. Lo schema di formazione del sinkhole è riportato in figura 7.

I casi di sinkholes in rocce evaporitiche sono di frequente tra i più catastrofici, coinvolgendo direttamente infrastrutture antropiche e centri abitati. Ciò a causa della rapida evoluzione dei fenomeni in questo tipo di rocce, connessa alla elevata solubilità delle stesse che consente, di conseguenza, un veloce sviluppo dei sinkholes, o dei fenomeni di subsidenza. La complessità delle successioni evaporitiche, in cui i livelli di gesso e sale sono in genere associati e variamente intercalati a depositi argillosi, rende ancora più problematica l'individuazione dei probabili siti di occorrenza di futuri sinkholes.

Negli Stati Uniti d'America, depositi evaporitici

sono presenti in ben 32 dei 48 stati continentali (JOHNSON, 1997, 2005b, 2007; MARTINEZ *et alii*, 1998) e determinano il verificarsi di sinkholes su vaste aree: tra queste, la più nota è il Bacino Permiano, che si estende dal Texas occidentale e dal New Mexico sud-orientale fino all'Oklahoma, al Kansas e al settore sud-orientale del Colorado, e che comprende la gran parte delle oltre 500 cavità nei gessi degli USA (QUINLAN *et alii*, 1986). Ma anche altre zone, come il Bacino Holbrook (anche noto come Bacino Supai) in Arizona, risultano intensamente coinvolte nello sviluppo di sinkholes e subsidenze, derivanti da dissoluzione di depositi salini e da deformazioni nei sovrastanti materiali di copertura (NEAL *et alii*, 1998).

Tornando alle rocce carbonatiche, un'altra area estremamente sensibile alla presenza di sinkholes è la Lehigh Valley della Pennsylvania (una porzione della cosiddetta Grande Valle degli Appalachi), che si estende per parecchie decine di chilometri su un substrato carbonatico del Cambriano costituito da calcari dolomitici con noduli di selce. L'evento più noto è quello avvenuto nel febbraio 1994 ad Allentown, che ha provocato seri danni, e causato la successiva demolizione, dell'edificio per uffici Corporate Plaza e di un adiacente parcheggio.

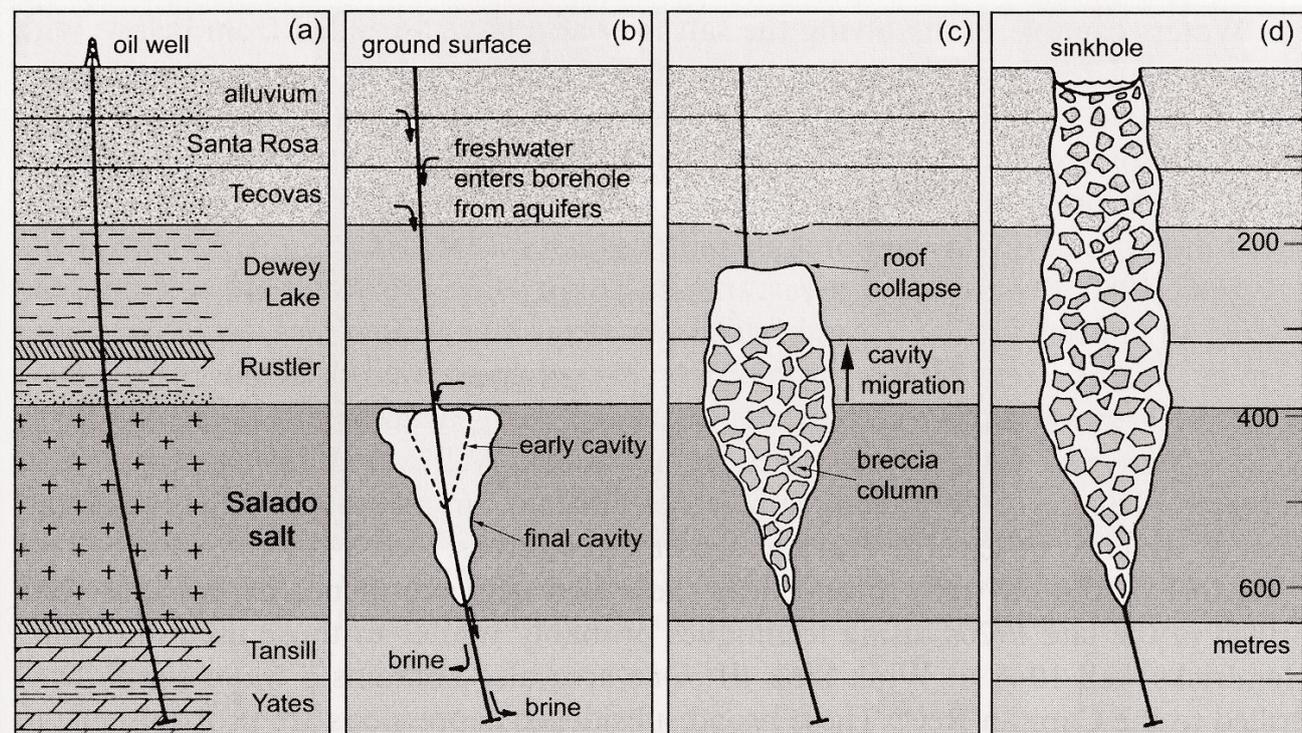


Figura 7. Sezioni schematiche illustrative della formazione del sinkhole Wink Sink # 1 (da JOHNSON, 2005a): a) pozzo di estrazione petrolifera realizzata nel 1928; b) sviluppo ed ampliamento della cavità da dissoluzione nel sale, durante e dopo l'estrazione del petrolio; c) migrazione verso l'alto della cavità attraverso i sovrastanti depositi; d) collasso in superficie con formazione del sinkhole nel 1980. - Schematic cross sections showing the interpreted relationships between Hendricks oil well 10-A and the development of Wink Sink # 1 (after JOHNSON, 2005a): a) well drilled in 1928; b) dissolution cavity grows in the salt during and after oil production; c) cavity migration through beds above the salt; d) surface collapse to form the sinkhole in 1980.

gio multi-piano, costruiti nel 1986 (DOUGHERTY, 2005). Sebbene l'aspetto pianeggiante della zona indurrebbe a pensare a una situazione geologica abbastanza tranquilla ed omogenea, in realtà esiste una complessa struttura nel sottosuolo, che rende estremamente difficoltosa la previsione della localizzazione di futuri sinkholes. Fenomeni di alterazione nei calcari nella parte più prossima al piano campagna hanno determinato infatti la formazione di pinnacoli di roccia, la cui profondità varia dalla prossimità alla superficie sino a più di 30 m. Tali pinnacoli sono ricoperti da una combinazione di depositi glaciali, alluvionali e colluviali, e dalla parte più superficiale del substrato roccioso, alterato in maniera discontinua e non omogenea. Queste caratteristiche, insieme al mancato riconoscimento, nel corso delle indagini geognostiche preventive alla costruzione dell'edificio, di cavità carsiche sotterranee e al non raggiungimento del substrato, fecero propendere all'epoca per una struttura di fondazione interamente basata sui terreni di copertura. I fenomeni di suffosione, e l'infiltrazione di terreni sciolti di copertura all'interno delle fessure nel sottostante substrato, con conseguente rottura degli archi di sostegno che si erano sviluppati nel regolite, hanno portato alla formazione del sinkholes per subsidenza della copertura (DOUGHERTY, 2005).

Intensa alterazione del substrato, per l'azione combinata di fenomeni di dissoluzione e erosionali, è anche invocata da COOLEY (2002), che analizza i fattori di controllo nello sviluppo di sinkholes da collasso e da subsidenza (tipo sinkholes da richiamo) in aree a copertura argillosa dell'Alabama e del Kentucky, al di sopra di rocce carbonatiche. La rimozione della parte più superficiale del substrato carbonatico, interessata da dissoluzione, determina i primi effetti di lento abbassamento del suolo che, nel caso si individuino zone a maggiore dissoluzione (in genere concentrate lungo le principali discontinuità dell'ammasso roccioso), possono condurre nel tempo a formazione di vere e proprie cavità, e quindi al collasso della sovrastante copertura. COOLEY evidenzia in particolare il ruolo svolto, nell'ambito dell'epicarso, dalla circolazione idrica sotterranea, i cui flussi preferenziali individuano le zone a maggiore pericolosità da futuri sinkholes (COOLEY, 2002).

Nella Sacramento Valley, in California meridionale, è invece stato riportato da HIGGINS & SCHONER (1997) lo sviluppo di sinkholes (dimensioni 4-5 m di larghezza, 3-4 di profondità) su zone a debole pendenza in complessi di conoidi alluvionali (*bajadas*). I sinkholes interessano suoli sabbioso-limosi e siltosi sviluppati su depositi

alluvionali olocenici. Si formano a seguito di processi di piping che partono da livelli di ghiaie presenti nel sottosuolo. Tali livelli sono a maggiore permeabilità dei depositi sovrastanti, fungono da collettori delle acque presenti nel sottosuolo e sono collegati alla superficie mediante profonde fratture da essiccamento. Queste ultime si estendono fino a 7-8 m di profondità, e sono prodotte dalle coltivazioni di alfalfa, una pianta in grado di penetrare il terreno con le proprie radici alla ricerca di acqua sino a elevate profondità.

Situazione ancora di tipo diverso è quella riscontrata nel duomo salino di Weeks Island, lungo la costa della Louisiana. Nel periodo 1975-81, una miniera sotterranea di sale (che era stata aperta nel 1902, ed era rimasta attiva fino al 1977) fu utilizzata al fine di contenere una parte delle riserve strategiche di petrolio statunitense. Nel maggio 1992, un sinkhole si aprì al margine meridionale della miniera, per una larghezza di 11 m e profondità di 9 m, con pareti quasi verticali nel loess pleistocenico di copertura (NEAL & MYERS, 1995). Successivamente, esso si ampliò, e contemporaneamente se ne aprì un altro di minori dimensioni, determinando la decisione di spostare in altro sito le riserve di petrolio.

I sinkholes, a evoluzione particolarmente rapida data la presenza di depositi di sale, presentarono una genesi per suffosione, con successivo collasso del loess nei vuoti in ampliamento nel sottosuolo (NEAL, 2005). Questo tipo di fenomeni può anche pervenire a stabilizzazione naturale, una volta che l'infiltrazione di sedimenti non consolidati "sigilla" le cavità presenti nel sottosuolo.

Oltre a studi su specifici casi di studio, o singoli sinkholes, esiste poi un'ampia letteratura, in costante aumento, di lavori a carattere più generale, che sfruttano le potenzialità offerte dalla gestione informatizzata di banche dati. La notevole diffusione di sinkholes su vasti territori degli Stati Uniti d'America ha spinto infatti numerosi autori negli ultimi anni, grazie allo sviluppo ed utilizzo sempre crescente di sistemi informativi geografici, ad analizzare la distribuzione e morfometria dei sinkholes a scala regionale: South Dakota e Wyoming (EPSTEIN, 2000), Minnesota (GREEN *et alii*, 2002; GAO & ALEXANDER, 2003; GAO *et alii*, 2005), Illinois (ANGEL *et alii*, 2004), Missouri (ORNDORFF *et alii*, 2000; ORNDORFF & LAGUEUX, 2000; WEARY & ORNDORFF, 2001), Kentucky (FLOREA *et alii*, 2002; FLOREA, 2005), Ohio (APPLEGATE, 2003), e la stessa Florida (BRINKMANN *et alii*, in stampa), sono solo alcuni degli esempi di studi condotti in ambiente GIS, finalizzati a individuare le relazioni esistenti tra la presenza di sinkholes e alcuni fattori quali topo-

grafia, idrografia superficiale, strutture geologiche, tettonica, ecc.

MESSICO

Il Messico presenta alcuni tra i più spettacolari esempi di sinkholes, che sono noti con il termine spagnolo di *cenotes* (pozzi, dal termine Maya *dzonot*): si tratta di profonde depressioni a pareti verticali che raggiungono in genere la falda, e che sono riconducibili a crolli della volta di cavità sotterranee, o a dissoluzioni che agiscono dal basso verso l'alto, secondo le modalità dei processi ipogenici (KLIMCHOUK, 2007). La densità dei cenotes può essere molto alta: solo nella parte settentrionale dello stato del Yucatán ne sono stati, ad esempio, individuati oltre 2400 (PEREZ AGUILAR & GONZALEZ HERRERA, 2002) nei depositi calcarei e dolomitici del Terziario.

Nonostante la eccezionalità delle forme, e la loro elevata diffusione sul territorio messicano, non sono molti a tutt'oggi i casi di studio analizzati nel dettaglio. Fanno eccezione due sistemi studiati recentemente da ricercatori statunitensi: il primo è il Sistema Zacatón, anche noto con il nome di Cenotes de Tamaulipas o Cenotes de Aldama. È ubicato nel Messico nord-orientale, nella Sierra de Tamaulipas, e presenta in superficie una serie notevole di profondi sinkholes di grosse dimensioni, alcuni dei quali allagati, mentre altri sono stati sigillati dalla deposizione di travertino. Tra i primi, El Zacatón è il più noto, e con i suoi -329 m di profondità costituisce il secondo più profondo pozzo allagato al mondo, superato solo dai -392 m del Pozzo del Merro, nel Lazio (CARAMANNA, 2002). Il Sistema Zacatón, oltre i sinkholes su citati, comprende anche vaste grotte vadose, sviluppate nei calcari di avanscogliera, scogliera e retroscogliera del Cretaceo inferiore, e la sua evoluzione è legata all'attività vulcanica pleistocenica, che ha fornito il "motore" necessario alla rapida dissoluzione che ha dato origine al sistema ipogeo, e alle sue manifestazioni in superficie (GARY *et alii*, 2003; GARY & SHARP, 2006).

L'altra situazione a cui si faceva riferimento è invece localizzata nello stato del Tabasco, nel Messico sud-orientale: si tratta della Cueva de Villa Luz, che si sviluppa per oltre 2 km di lunghezza a profondità tra i 10 e i 20 m dal piano campagna, con andamento prevalentemente orizzontale (HOSE & PISAROWICZ, 1999). Anche questo sistema presenta numerosi collegamenti con l'esterno, sotto forma di sinkholes, presumibilmente prodotti da effetti dissolutivi in risalita, anche qui forse connessi ad attività vulcanica (il vulcano El Chichon dista poche decine di chilometri).

I due sistemi a cui si è fatto brevemente cenno sono soltanto i primi esempi analizzati di una casistica ben più vasta, che non si limita al solo Messico, ma comprende anche altri stati del Centro America e dell'America Meridionale.

EUROPA

SPAGNA

A partire dalla seconda metà degli anni '70, molti studi sono stati avviati in Spagna su fenomeni di subsidenza e sinkholes, sia analizzati con approcci puramente geomorfologici (VAN ZUIDAM, 1976; SORIANO, 1986; GRACIA, 1991) che, specie nei decenni più recenti, con integrazioni geologico-applicative e geofisiche. L'area indubbiamente di maggiore interesse riguardo la tematica dei sinkholes è la valle dell'Ebro, nella Spagna nord-orientale, e in particolare i settori nei dintorni della città di Saragozza, dove la diffusione di sinkholes in aree alluvionali risulta particolarmente elevata. Geologicamente, i terreni interessati da queste fenomenologie sono successioni evaporitiche del Terziario, ricoperte da depositi detritico-alluvionali e terrazzati recenti. Veri e propri campi di sinkholes, con densità anche superiore ai 150 eventi per 0.25 km² (MALDONADO *et alii*, 2000), sono presenti in settori diversi della valle dell'Ebro, da La Puebla de Alfindén e Alfajarín (RODRIGUEZ VIDAL, 1986; BENITO FERRANDEZ, 1987), alla zona ad ovest di Saragozza (SIMÓN *et alii*, 1991), al Barranco de Torrecilla (ARAUZO & GUTIERREZ, 1995), solo per citare alcuni dei casi più studiati. In buona parte, i sinkholes sembrano interessare le zone terrazzate più recenti sulle sponde del fiume Ebro, ma non si limitano a tale contesto morfologico. Anche tipologicamente, c'è un'ampia varietà di genesi nello sviluppo dei sinkholes, da eventi di collasso a altri per suffosione e richiamo. La pericolosità derivante da sinkholes nelle evaporiti del bacino dell'Ebro risulta quindi elevata, e in passato molti eventi hanno determinato seri danni a insediamenti e infrastrutture di collegamento (BENITO *et alii*, 1995; GUTIERREZ, 2003).

In ambienti geologici tipo carso alluvionale o carso coperto, gli effetti possono infatti non portare a situazioni chiaramente definite in superficie, con formazione di vere e proprie voragini, ma bensì a lente deformazioni e subsidenze in grado comunque di produrre notevoli danni all'ambiente antropizzato. I casi delle città di Calatayud (GUTIERREZ, 1996; GUTIERREZ & COOPER, 2002) e di Cadrete (GUERRERO *et alii*, 2004a) sono tra i più noti in tal senso.

Alcuni studi sono dedicati quasi esclusivamente

all'applicazione di tecniche geofisiche per individuazione di strutture poco profonde connesse a fenomeni di sinkholes o subsidenza: è il caso ad esempio dell'utilizzo del georadar nei pressi della città di Teruel, nell'est della Spagna: nell'ambito dei primi metri della successione evaporitica ivi affiorante, la presenza di riflettori delle onde elettromagnetiche ha consentito di individuare piccole fagliazioni sub-verticali, con rigetti nell'ordine di qualche centimetro, prodotte dall'accomodamento degli strati evaporitici a seguito di collassi locali nei sottostanti depositi (MARTIN CRESPO & GOMEZ ORTIZ, 2007). Non sempre tali situazioni corrispondono a depressioni e deformazioni in superficie.

Utilizzando diverse tecniche e metodologie, SIMÓN *et alii* (2007) hanno analizzato invece la distribuzione spazio-temporale di sinkholes nei sistemi alluvionali dell'area centrale del bacino dell'Ebro, presso Saragozza: i paleo-fenomeni sono stati identificati mediante la realizzazione di trincee, mentre i casi storici dall'analisi aereo foto-interpretativa, e quelli attuali, infine, da rilievi in situ. I risultati mostrano che i fenomeni in oggetto sono stati estremamente abbondanti nel corso del Quaternario, con tipologie variabili da eventi

rapidi (tipo collasso) ad altri lenti, con caratteristiche di subsidenza. Per quanto riguarda gli ultimi decenni, sembra invece che la densità dei fenomeni in assenza di perturbazioni antropiche, non vari significativamente nel tempo.

Ciò nonostante, come precedentemente accennato, laddove le infrastrutture e l'antropizzato hanno interagito con tali forme (sepolte e non) sono stati registrati danni, anche rilevanti (SORIANO & SIMÓN, 2002; GUERRERO *et alii*, 2004b; GUTIERREZ-SANTOLALLA *et alii*, 2005).

In un recente lavoro, GUTIERREZ *et alii* (2007) propongono una classificazione genetica dei sinkholes, derivata dall'osservazione degli eventi paleo-carsici studiati dagli Autori nelle successioni evaporitiche della Spagna nel corso degli anni. Essi distinguono le tipologie di sinkholes in funzione dei processi e dei materiali coinvolti (Fig. 8). I processi sono l'insaccamento (*sagging*), la suffosione e il collasso. I materiali sono distinti in copertura superficiale (*cover*), depositi di copertura (*caprock*) e substrato (*bedrock*). La suffosione può riguardare solo la copertura superficiale, mentre gli altri processi possono coinvolgere tutte le tipologie di materiali.

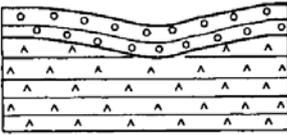
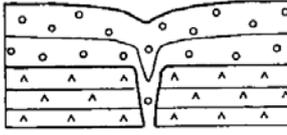
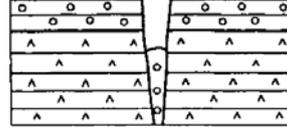
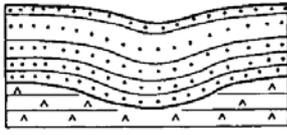
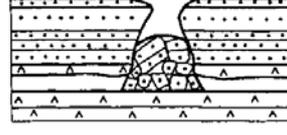
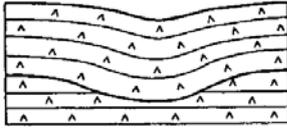
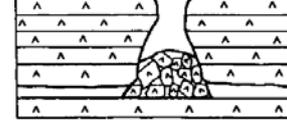
MAIN SINKHOLE TYPES			
MATERIAL	PROCESS		
	Sagging	Suffosion	Collapse
Cover	<p>Cover sagging sinkhole</p> 	<p>Cover suffosion sinkhole</p> 	<p>Cover collapse sinkhole</p> 
Caprock	<p>Caprock sagging sinkhole</p> 		<p>Caprock collapse sinkhole</p> 
Bedrock	<p>Bedrock sagging sinkhole</p> 		<p>Bedrock collapse sinkhole</p> 

Fig. 8. Principali tipologie di sinkholes, secondo GUTIERREZ *et alii*, 2007. I sinkholes per dissoluzione, generati per abbassamento della superficie del terreno a causa della corrosione, non sono inclusi. - *The main subsidence sinkhole types, according to GUTIERREZ et alii, 2007. Solution sinkholes generated by the corrosional lowering of the ground surface are not included.*

INGHILTERRA

Sinkholes per collasso della copertura sono presenti nella zona di affioramento dei gessi nei dintorni della città di Ripan, nello Yorkshire (COOPER, 1986, 1988) e a Derby (COOPER & SAUNDERS, 2002). Tali fenomeni derivano da diversi tipi di processi, che possono anche agire in combinazione tra essi. I principali individuati da COOPER sono:

- dilavamento di sedimenti non consolidati (movimento verso il basso di sedimenti in vuoti esistenti o in breccia pipes, con conseguente ampliamento della depressione superficiale);
- collasso graduale di materiali non consolidati in copertura su gessi (insaccamento di materiali sovrastanti un vuoto e concomitante abbassamento dell'interfaccia copertura/gesso);
- collasso catastrofico di sedimenti non consolidati in vuoti pre-esistenti (processo che può essere preceduto da un periodo di graduale subsidenza, e che presumibilmente richiede un meccanismo di innesco; consiste nello sviluppo progressivo verso l'alto di un vuoto in materiali non consolidati, possibilmente accompagnato da rimozione di sedimento da parte di rapidi flussi d'acqua attraverso il vuoto);

- collasso catastrofico di strati competenti in una cavità (propagazione di breccia pipe; rottura dei materiali che costituivano un ponte al di sopra della cavità; in genere richiede un meccanismo d'innesco).

Sinkholes e subsidenza sono connessi a sistemi carsici sotterranei nei depositi gessosi del Permiano (spessore medio 40 m) contenuti all'interno di marne, poggianti direttamente su un acquifero dolomitico, a profondità di circa 55 m dal p.c. La sovrapposizione dei depositi gessosi solubili al di sopra dell'acquifero determina lo sviluppo di cavità di tipo labirintico, a rapida evoluzione e la cui manifestazione superficiale di frequente avviene mediante formazione di sinkholes, come avvenuto nei casi più recenti, tra cui quello del 23 aprile 1997 (COOPER, 2005).

I casi di sinkholes per collasso della copertura, provocati dalla presenza di un vuoto nel terreno al di sopra di una cavità nel sottostante substrato, sono stati oggetto di analisi da parte di THARP (1999), che analizza le condizioni di rottura di tipo compressivo per propagazione e coalescenza di fratture, e quelle per infiltrazione di suolo nel vuoto a causa di incrementi nella pressione dell'acqua; egli non considera invece i meccanismi di

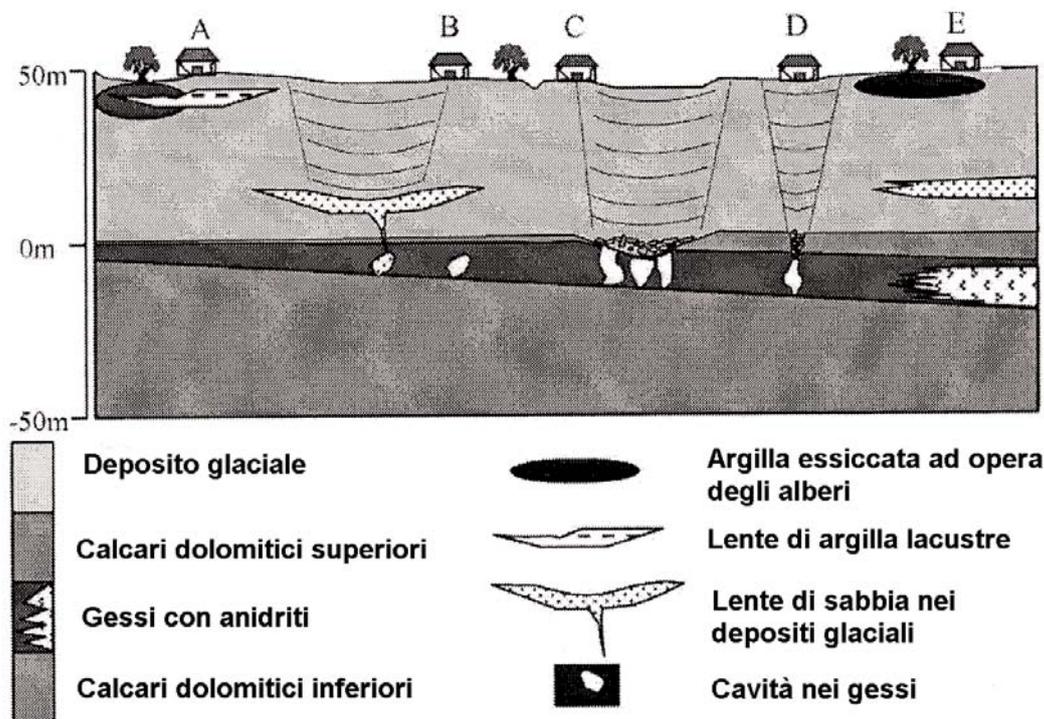


Figura 9. Schema concettuale dei meccanismi di subsidenza nei gessi dell'Inghilterra settentrionale (da Lamont-Black et alii, 2002): A) essiccamento di argille lacustri nei periodi secchi, con effetti di amplificazione ad opera degli alberi; B) dilavamento di sabbie e silts contenuti all'interno dei depositi glaciali in cavità carsiche nei gessi; C) graduale abbassamento dell'interfaccia tra depositi glaciali e gesso; D) migrazione verso l'alto di cavità carsiche nei gessi; E) essiccamento localizzato e restringimento delle argille ad opera di alberi di grandi dimensioni. - *Conceptual model of subsidence mechanisms (after Lamont-Black et alii, 2002): A) desiccation of lacustrine clays in dry periods (amplified by trees); B) downwashing of sand and silt in the till into karstic voids in the gypsum; C) gradual lowering of till/gypsum interface; D) upward migration of karstic voids in the gypsum; E) localized desiccation and shrinking of clays due to large trees.*

erosione e piping, nei quali terreni privi di coesione o dispersivi sono trasportati dall'azione dell'acqua.

LAMONT-BLACK *et alii* (2002), nell'ambito dello studio ROSES (Rischio di Subsidenza per Dissoluzione di Carbonati) finanziato dalla Comunità Europea, analizzano un non meglio specificato sito nell'Inghilterra settentrionale, caratterizzato da una sequenza di 40-50 m di depositi glaciali e argille laminate, in copertura su dolomie, calcari dolomitici, gesso e marne del Permiano. All'interno della sequenza glaciale sono presenti lenti di silts e sabbie soffici e sature d'acqua.

La zona è interessata da fenomeni di subsidenza, manifestatisi sotto forma di depressioni superficiali il cui diametro varia da 10 a 100 m e che hanno interessato proprietà residenziali, determinando costi per lavori di sistemazione superiori a un milione di sterline (nonostante la massima subsidenza osservata sugli edifici non superi i 300 mm). Diversi meccanismi sono stati ipotizzati per spiegare tali fenomeni. Essi sono riportati in figura 9 e sono riconducibili a due categorie principali: restringimento delle argille e carsismo nei gessi. Altre situazioni di sinkholes si verificano nel *chalk*, diffuso in gran parte dell'Inghilterra meridionale e orientale e particolarmente suscettibile a fenomeni di sinkholes, in genere per subsidenza della copertura, come quello registrato nel 1993 a Chalfont St. Peter, ad ovest di Londra, dove la successione geologica consiste in sabbie e ghiaie di origine fluvio-glaciale, in spessori di 9-10 m, al di sopra del substrato, costituito appunto dal *chalk* (EDMONDS, 2005). Anche in altre zone, sempre in Inghilterra meridionale, lo sviluppo di fenomeni di sinkholes nel *chalk* risulta frequente (MC DOWELL, 1989; MC DOWELL & POULSON, 1996), con buona parte degli eventi connessa a cause antropiche, principalmente perdita di acque dalle condutture (MC DOWELL, 2005). Tipologicamente, i sinkholes osservati rientrano nella categoria dei sinkholes per richiamo.

BELGIO

Nel Belgio meridionale, al confine con la Francia, è localizzata la zona di Tournai, nel bacino idrografico del fiume Escaut. Si tratta di una tipica area di carso coperto (KAUFMANN & DECEUSTER, 2005), dove un substrato in calcari del Carbonifero è coperto da depositi meso-cenozoici, principalmente costituiti da marne, sabbie ed argille, in spessore variabile da pochi metri a più di 100 m. In quest'area sono stati identificati circa 200 sinkholes di forma circolare, a ripide pareti, di ampiezza variabile tra 1 e 30 m, e profondi fino a

10 m (KAUFMANN & QUINIF, 2002). Essi si sono originati a partire da forme paleocarsiche, la cui origine va ricercata nel particolare sviluppo di fenomeni di alterazione (*weathering*) che hanno interessato il substrato calcareo.

Gli Autori, nel tentativo di elaborare una carta della pericolosità da sinkholes, rimarcano le scarse informazioni desumibili da foto aeree ed immagini satellitari, sottolineando altresì che la disponibilità di dati sui passati eventi rappresenta il principale elemento ai fini della definizione delle aree a maggiore potenzialità di sinkholes. L'elaborazione da loro effettuata in ambiente GIS ha quindi utilizzato, come principali parametri per la valutazione del geohazard, la densità dei sinkholes noti e l'altezza del calcare al di sopra della falda. Essi affermano anche che i collassi maggiori tendono ad avvenire nelle zone dove la copertura è più spessa. La più significativa influenza dei depositi di copertura è connessa alla loro permeabilità, da cui dipende la ricarica della falda.

PORTOGALLO

FORTH *et alii* (1999) hanno svolto studi per la realizzazione di una carta della pericolosità da fenomeni di instabilità del terreno in area carsica, lungo la costa dell'Algarve, con fenomeni di sinkholes (non meglio specificati) nelle calcareniti mioceniche e nelle sabbie pleistoceniche. Le dimensioni sono variabili, ma raramente superano i 50 m di diametro.

Il riempimento parziale o totale di molti sinkholes con sabbie del Pleistocene ne consente una datazione relativa, attribuendone la formazione a condizioni ambientali pre-Pleistoceniche.

PAESI BALCANICI

L'area dei Balcani, e in particolare i paesi della ex Jugoslavia, sono tra le aree più importanti del mondo per le ricerche carsiche, dato che gli studi pionieristici sul carsismo vennero condotti a partire dall'800 nella zona del Carso Classico, il territorio originariamente compreso tra Italia e Jugoslavia, e che ora in gran parte rientra nei confini sloveni. La ricchezza di forme carsiche, epigee ed ipogee, di questi territori è notevole. La Slovenia, in particolare, presenta tra le molteplici forme del paesaggio carsico anche una forte presenza di sinkholes (GAMS, 2000; CAR, 2001). Nella maggior parte dei casi si tratta però di morfologie puramente carsiche, dato l'affioramento diretto in superficie delle rocce carbonatiche carsificabili, che solo in alcuni settori del paese risultano coperte da litologie differenti. Tra i sinkholes più noti spiccano, ad esempio, le spettacolari forme da collasso del sistema carsico di Skocjanske Jama

e quelle di Postojna (STEPISNIK, 2004), alcune delle quali appaiono come forme relitte a causa dell'azione erosionale che ha agito su di esse, specialmente ai loro margini (SEBELA & CAR, 2000). In altre situazioni, a minore energia di rilievo, le originarie forme del paesaggio create da sinkholes possono essere anche parzialmente o totalmente modificate dall'azione dell'uomo, come evidenziato da BREG (2007) nel caso del polje di Logasko. Si tratta prevalentemente, in questo caso, di sinkholes da dissoluzione e da suffosione.

SUSTERSIC (2002) osserva invece la concordanza tra la distribuzione dei sinkholes e l'orientazione delle principali faglie che agiscono come linee di drenaggio sotterraneo, determinando lo sviluppo di sistemi carsici ipogei, come quello di Karlovice, al margine del polje di Cerknisko, nella Slovenia centro-meridionale.

Oltre alla Slovenia, sinkholes sono più o meno diffusi in tutti i paesi dell'area balcanica, a cominciare dalla Bosnia-Herzegovina, dove vi sono alcune aree caratterizzate da elevata presenza di campi di sinkholes, in gran parte del tipo da dissoluzione (GAMS, 2000). Un notevole sinkhole da collasso costituisce invece l'ingresso a una delle grotte più note in Serbia, quella di Tisova Jama, sul Monte Beljanica nella parte orientale del paese (CALIC LJUBOJEVIC & LJUBOJEVIC, 2000). Analogamente, anche in Croazia sono numerose le cavità a cui si accede mediante sinkhole da collasso, a pareti nette e verticali, o da dissoluzione e/o suffosione, con fianchi più blandi (BUZJAK, 2000).

ALBANIA

Nel territorio albanese, vaste aree sono interessate da fenomeni di subsidenza e/o sinkholes, sia in zone carsiche che in altre dove c'è una copertura di depositi recenti, anche con spessori notevoli (PARISE *et alii*, 2004). I principali fenomeni di subsidenza riguardano grosse strutture tipo graben, e sono essenzialmente connessi alla evoluzione neotettonica dell'Albania, caratterizzata da un generale sollevamento iniziato a partire dal Pliocene (ALIAJ *et alii*, 2001). Oltre a tali situazioni, c'è però un'ampia segnalazione di casi di sinkholes, che arrivano a costituire una delle principali forme del paesaggio in alcune aree, come il distretto di Dumre (PARISE *et alii*, 2007) o il massiccio calcareo di Mali me Gropa (QIRIAZI, 2001; SALA & PARISE, 2006). I sinkholes in ambiente carsico, su aree in affioramento di calcari, sono principalmente connessi a dissoluzione delle rocce carbonatiche o a crolli per presenza di cavità sotterranee a piccola profondità dalla superficie, mentre nelle zone nei gessi (è il caso, ad esem-

pio, di Dumre) la genesi sembra principalmente connessa a cavità sotterranee a maggiore profondità, che richiamano il sovrastante materiale (depositi residuali argillosi, in spessori anche superiori ai 20-30 metri) mediante meccanismi tipo sinkholes da richiamo.

Dato il notevole degrado ambientale che caratterizza il paese albanese, sono poi numerosi i casi di subsidenza e sinkholes connessi a discutibile gestione dell'ambiente e ad attività antropica (es. EFTIMI & TAFILAJ, 1999; QIRIAZI *et alii*, 2005), che però esulano dalla presente trattazione e per i quali si rimanda ai lavori citati in bibliografia.

LITUANIA

Nel nord della Lituania, rocce evaporitiche e dolomitiche sono presenti al di sotto di coperture quaternarie di spessore massimo di 10 m. Questa zona risulta estremamente interessata da sviluppo di sinkholes (TAMINSKAS & MARCINKEVICIUS, 2002), tanto che a partire dal 1994 per un quinquennio sono state svolte analisi di monitoraggio sui principali caratteri idrologici, idrogeologici e ambientali della zona. Tali ricerche, secondo gli Autori, evidenziano che l'incremento nello sviluppo dei sinkholes è da imputare principalmente a variazioni climatiche, ed in primo luogo all'aumento delle precipitazioni, all'aumento della temperatura, e agli inverni più miti, tutti fattori che nel complesso favoriscono una maggiore circolazione tra acque superficiali e sotterranee, ed un maggior sviluppo del processo carsico. Allo stesso tempo, però, si segnalano anche alcune possibili cause di natura antropica, a cominciare dal sovrasfruttamento delle acque sotterranee e dalla realizzazione di opere ingegneristiche che hanno determinato notevoli variazioni nell'originario assetto idrologico dell'area.

Nella stessa zona, anche altri Autori, e in particolare PAUKSTYS (2005), descrivono l'intensa presenza di sinkholes, talvolta in gruppi abbastanza vicini, con successiva coalescenza e formazione di bacini occupati da laghi; tra questi, il maggiore è il lago Ilgasis (Lago Lungo), di estensione superiore a 1 km, largo 200 m. La maggior parte dei sinkholes appare concentrarsi nelle zone in cui la copertura quaternaria presenta spessori inferiori ai 5 m, ed è governata dai principali sistemi di fratturazione locale. La notevole diffusione dei fenomeni ha indotto il governo lituano nel 1991 a dichiarare la regione "area protetta", imponendo limitazioni sul tipo di colture da impiantare e sull'uso di fertilizzanti (Tabella 1), al fine di limitare sia l'inquinamento delle acque sotterranee che lo sviluppo di ulteriori sinkholes a causa dell'immissione nel sottosuolo di sostanze che favorissero la

Unità territoriale	Densità di sinkholes per 100 ha	Pratiche agricole	Restrizioni
1	< 20	50% coltivazione di grano 40% pascolo < 10% coltivarazioni con radici	NPK max: 90 kg/ha Concime max: 80 Mg/ha
2	20-50	Grano e pascolo Proibite coltivazioni con radici Proibiti nuovi frutteti o giardini	NPK max: 60 kg/ha Concime max: 60 Mg/ha
3	50-80	Permesso solo il pascolo	NPK max: 60 kg/ha Nessun fertilizzante. Nessun pesticida, ad eccezione dei fungicidi.
4	> 80	Prati e foreste	Tutti i fertilizzanti e pesticidi sono proibiti.

Tabella 1 – Unità territoriali stabilite per le aree carsiche nei gessi della Lituania, in funzione della densità di sinkholes (da PAUKSTYS, 2005); sono anche riportate le pratiche agricole consentite e le relative restrizioni. NPK = nitrogeno/fosforo/potassio. - *Land groups established for the Lithuanian gypsum karst, with their defining sinkhole densities related to their agricultural permitted practices and restrictions (after PAUKSTYS, 2005). NPK = nitrogen/phosphorus/potassium.*

dissoluzione nei gessi (PAUKSTYS, 2005).

UCRAINA

L'Ucraina occidentale comprende alcuni dei più estesi sistemi carsici del mondo in rocce evaporitiche (KLIMCHOUK, 1992, 2000): i gessi miocenici presentano spessori dai 40-60 m agli 80-100 m, sono ricoperti da marne e argille più recenti, e interessati dallo sviluppo di 14 grotte di lunghezza superiore al chilometro, tra le quali spiccano gli straordinari sistemi di Optimistychna (214 km), Ozerna (111 km) e Zoloushka (92 km). Oltre l'eccezionale ricchezza ipogea, questo territorio presenta in superficie una notevole frequenza di sinkholes, principalmente connessi ad eventi di crollo o a fenomeni di suffosione (KLIMCHOUK & ANDREJCHUK, 1996). Approfondite ricerche svolte negli ultimi 20 anni, nell'ambito delle quali è stato fondamentale il ruolo svolto dalle esplorazioni speleologiche, che hanno consentito l'osservazione diretta (dall'interno, si potrebbe dire) del territorio, hanno evidenziato come la presenza di sinkholes di collasso in superficie non corrisponda necessariamente agli ambienti di maggiori dimensioni presenti nel sottosuolo (KLIMCHOUK & ANDREJCHUK, 2002): molte delle sale ipogee più ampie, incluse quelle che maggiormente si spingono verso la superficie topografica, non risultano infatti ubicate in corrispondenza di sinkholes, dislocati invece in zone limitrofe, local-

mente anche in posizione esterna rispetto allo sviluppo degli ambienti ipogei. KLIMCHOUK & ANDREJCHUK (2002) hanno individuato diversi meccanismi di sviluppo e evoluzione per i sinkholes, ponendoli in relazione alle caratteristiche litologiche e allo spessore dei depositi di copertura. Le situazioni più frequenti sembrano essere riconducibili alla presenza di strutture tipo cupole, create nel corso di fasi artesiane durante la speleogenesi del sistema carsico, in corrispondenza di zone di debolezza dei depositi di copertura; o alla formazione di condotti verticali, creati laddove si aprono vie di infiltrazione verso i gessi, a partire dalle coperture sovrastanti. In questo secondo caso, la percolazione attiva facilita la propagazione verso l'alto della cavità, sino a raggiungere eventualmente la superficie, con eventi di collasso catastrofico, come ad esempio quello di Dankivsky, avvenuto l'11 gennaio 1998, con apertura di una voragine profonda 22 m, a pochi chilometri dalla Zoloushka Cave.

RUSSIA

Il settore geografico nei pressi degli Urali rappresenta una delle aree classiche di carsismo nei gessi (DOROFEEV & ANDREJCHUK, 1990). Esso presenta alcune similitudini con la zona dell'Ucraina occidentale precedentemente descritta ma, allo stesso tempo, se ne differenzia per un carsismo policiclico (iniziato a partire dal Mesozoico), per il

maggiore spessore della successione carsificabile, e per la natura dei depositi di copertura, costituiti in Russia da orizzonti di breccie e da sedimenti limosi non consolidati. Le manifestazioni superficiali, sotto forma di sinkholes, sono comunque altrettanto spettacolari e diffuse che in Ucraina, e possono essere descritte mediante due diversi meccanismi (ANDREJCHUK & KLIMCHOUK, 2002): i) gravitativo, con evidenze di insaccamento e crollo della volta di cavità sotterranee; ii) combinazione di fenomeni di infiltrazione e gravitativi. Il secondo meccanismo consente la successiva propagazione verso la superficie, con apertura di sprofondamenti per collasso, a prescindere dallo spessore dei depositi di copertura. Il primo meccanismo, invece, riesce a raggiungere la superficie, e quindi a dar luogo alla formazione di sinkholes, solo al di sotto di determinati spessori della copertura. Ancora una volta, l'identificazione dei due meccanismi è stata possibile grazie a ricerche ed esplorazioni speleologiche, condotte nel sistema carsico di Kungurskaja, che hanno opportunamente integrato le usuali analisi geologiche e morfologiche di superficie (ANDREJCHUK & KLIMCHOUK, 2002).

Sebbene di origine antropica, non si può poi fare a meno di riportare lo straordinario collasso di Berezniki, avvenuto nel giugno 1986 in una delle più vaste miniere di potassa del mondo. La miniera è ubicata in sinistra orografica del fiume Kama, al margine occidentale della catena montuosa degli Urali. A partire dal gennaio 1986, vennero riscontrati i primi segnali della presenza di una cavità nei depositi salini (il cui spessore massimo è di 500 m), e nei mesi successivi l'evoluzione progredì verso l'alto sino a raggiungere la superficie con un evento catastrofico la notte del 25 giugno 1986: si creò un ampio sprofondamento, inizialmente profondo almeno 150 m, accompagnato da una forte esplosione causata dall'effetto pistone esercitato dalla massa di roccia crollata sull'aria intrappolata nella cavità, e dalla contro-spinta dell'aria verso l'alto (ANDREJCHUK, 1996, 2002).

Tra le altre zone russe, da segnalare inoltre la vasta area industriale di Dzerzhinsk, dove la presenza di rocce solubili, sulle quali sono in discordanza stratigrafica depositi argillosi e sabbiosi del Quaternario, crea la possibilità di sviluppo di fenomeni di sinkholes e di subsidenza: oltre 4000 eventi sono stati individuati, con una genesi prevalentemente del tipo per sinkholes da suffosione (KOUTEPOV *et alii*, 2007).

TURCHIA

Notevoli sinkholes da collasso sono riportati nelle successioni evaporitiche mioceniche della Turchia

orientale, nei pressi di Sivas. I gessi miocenici presentano uno spessore complessivo di circa 750 m, e comprendono significative proporzioni di argille. Essi risultano coperti da conglomerati e arenarie plioceniche, travertini del Pleistocene e depositi alluvionali e di conoide del Quaternario (KACAROGLU *et alii*, 1997; GUNAY, 2002). Numerosi sinkholes sono generalmente dislocati lungo le principali linee tettoniche, ad orientamento NW-SE e NE-SW; si tratta prevalentemente di strutture di collasso (KARACAN & YILMAZ, 1997). Tra i casi più spettacolari di sinkhole per collasso va segnalato quello di Kizilcam, a est di Hafik, profondo da 30 a 50 m e largo circa 350 m (WALTHAM, 2002). Come in molti altri casi di analoghe voragini nei depositi evaporitici di questa zona, il fondo della voragine è occupato da un lago con diametro di 220 m.

Altri sinkholes, per collasso della copertura vulcano-sedimentaria su un substrato carbonatico, sono riportati nella Turchia sud-occidentale, e precisamente nella piana di Konya. In questo caso si tratta però di strutture connesse alla costruzione della diga di May, terminata nel 1960, e alle successive variazioni del livello della falda (DOGAN & CICEK, 2002), secondo meccanismi tipo quelli descritti da Tharp (2002).

MEDIO ORIENTE

A Kuwait City nel 1988 un sinkhole profondo 3 m e largo 15 m si aprì in un lussuoso complesso residenziale alla periferia della città, seguito nell'anno successivo da tre altri sprofondamenti, di dimensioni inferiori (GOODINGS & ABDULLA, 2002). Anche se i fenomeni non produssero vittime, l'intera area dovette essere evacuata, e restare disabitata per timore di eventuali ulteriori fenomeni (AL-RIFAIY, 1990).

La locale situazione geologica è abbastanza tipica di climi aridi, con il substrato calcareo carsificato su cui poggia uno strato di sabbie debolmente cementate, a sua volta ricoperto da sabbie non cementate. La presenza di cavità all'interno del substrato determina la formazione di ponti nelle sabbie debolmente cementate, che con il tempo non riescono a autosostenersi e crollano nelle sottostanti cavità, fino eventualmente a raggiungere la superficie.

In Arabia Saudita, l'estesa presenza di litologie carbonatiche ed evaporitiche la cui età copre un arco temporale che si estende dal Cambriano sino al Quaternario, determina una notevole diffusione di depressioni carsiche e sinkholes, che non di rado provocano seri problemi in corso di realizzazione di opere ingegneristiche e infrastrutturali.

Tra le aree maggiormente interessate, si ricorda la zona di Dharhan, nell'oriente del paese (GROSCHE *et alii*, 1987; AMIN & BHANKER, 1997).

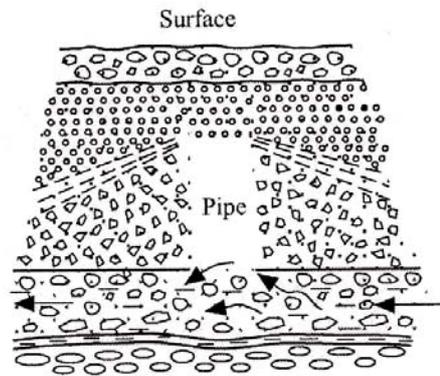
Entrambe le sponde del Mar Morto costituiscono un'area che negli ultimi anni è stata notevolmente studiata riguardo ai processi di sinkholes (Fig. 10). La difficile situazione politica medio-orientale si è riflessa anche su tali studi, con due filoni di ricerca nettamente distinti, uno portato avanti da parte degli israeliani, e l'altro in territorio giordano. Tra i primi studi specifici sui fenomeni di questa zona, ARKIN & GILAT (2000) hanno individuato due meccanismi principali di sviluppo dei sinkholes nelle zone di conoide alluvionale che caratterizzano la sponda occidentale del lago: i meccanismi sono rappresentati schematicamente nelle figure 11 e 12.

Più di recente, in ambito israelia-

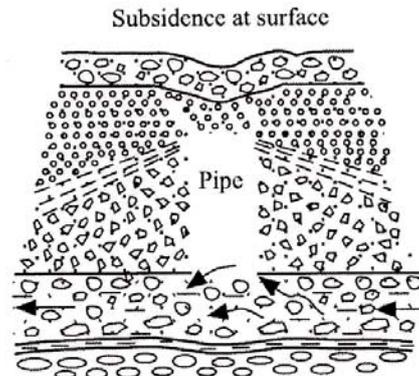
Fig. 10. Sinkholes allagati in Israele, nell'area di Ein Gedi, lungo la sponda occidentale del Mar Morto (da CLOSSON & KARAKI, in stampa). Ein Gedi è uno dei settori maggiormente interessati dallo sviluppo di sinkholes, con diametri variabili da meno di 1 m a diversi decimetri. Il colore deriva da proliferazioni algali (fonte: Internet, autore e data sconosciuti; fornita da D. CLOSSON). - *Flooded sinkholes in Israel, Ein Gedi area (after CLOSSON & KARAKI, in press). Ein Gedi is one of the most affected places along the Western coast of the Dead Sea. Sinkholes diameters range from less than one meter to several decimetres. Colour results from algae proliferation. Source: the Internet, unknown author, unknown date.*



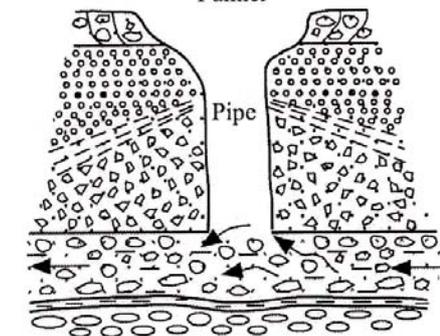
Stadio 1



Stadio 2



Stadio 3



Flusso laminare Flusso turbolento

- Livelli di ghiaia, sabbia e silt a stratificazione incrociata
- Ghiaia, sabbia e silt
- Ghiaia ben gradata, sabbia e silt
- Ghiaia poco gradata e silt
- Ghiaia poco gradata, silt e piccoli livelli argillosi

Fig. 11. Sinkhole nelle ghiaie, sulla sponda occidentale del Mar Morto (modificato da ARKIN & GIRAT, 2000): l'erosione sotterranea comincia al di sopra della zona interessata da flusso turbolento nel livello ghiaioso (stadio 1). Un vuoto e una cavità si sviluppano e propagano verso l'alto, con gli elementi più fini che vengono dilavati e le particelle grossolane compattate. In superficie, i primi effetti della subsidenza si registrano sotto forma di fratture circolari (stadio 2). Si ha infine il collasso improvviso degli strati superiori, e la formazione del sinkhole (stadio 3). Alla base del condotto, il materiale fine viene dilavato, e quello grossolano compattato. - *Gravel hole development at the western shore of the Dead Sea (modified after ARKIN & GIRAT, 2000): subsurface erosion begins above turbulent flow in gravel bed. A hollow and pipe develop upwards. Fines are washed out and larger particles compacted (Stage 1). Circular fractures develop at the surface (Stage 2). Sudden collapse of upper layer. Fine material was washed out at base of pipe and coarse material compacted (Stage 3).*

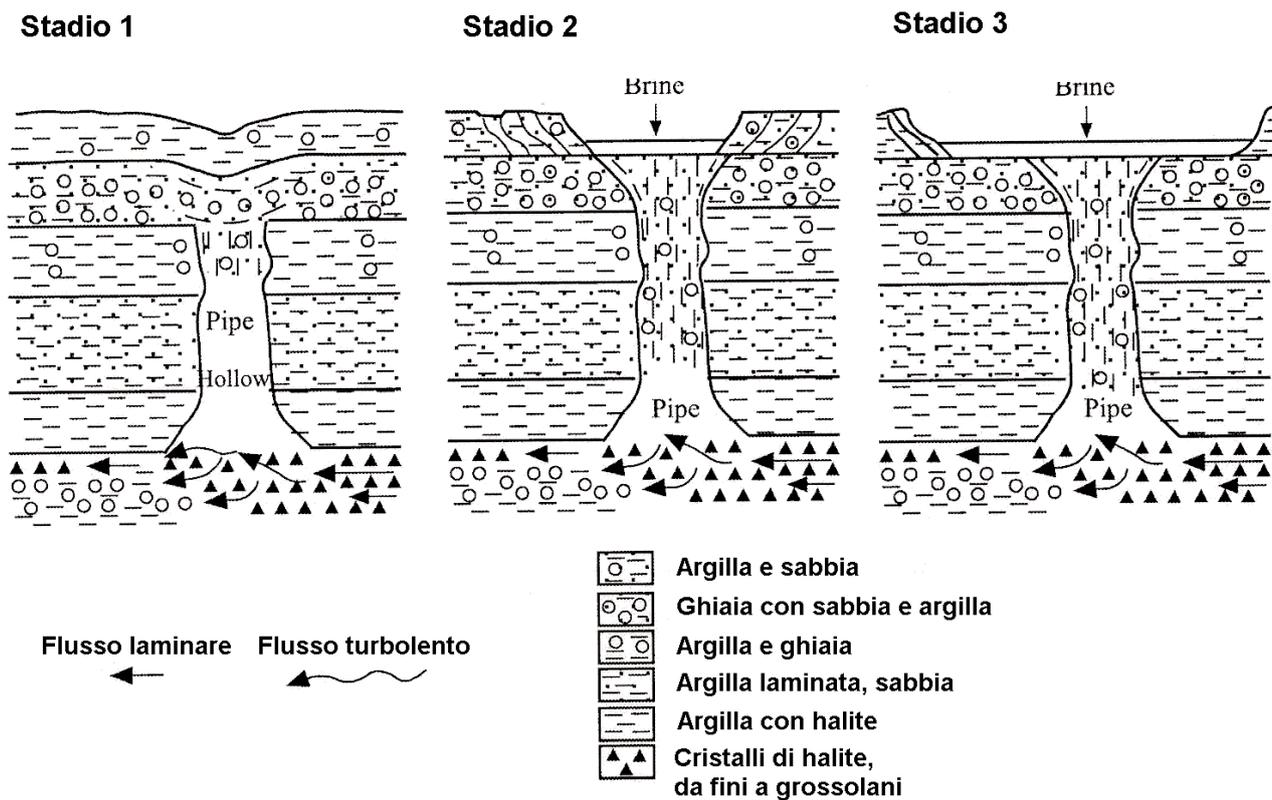


Fig. 12. Sinkhole nei materiali fini, sulla sponda occidentale del Mar Morto (modificato da ARKIN & GIRAT, 2000): l'erosione sotterranea ha inizio nelle ghiaie o nei livelli di cristalli di sale, dove il flusso da laminare diviene turbolento (stadio 1). Si forma una cavità, in risalita verso l'alto, e si comincia a osservare subsidenza in superficie. La subsidenza procede (stadio 2) con fratture concentriche in superficie, e formazione di una tipica forma a imbuto. Alla base del condotto, i materiali fini sono dilavati. Le pareti lungo i bordi del sinkhole crollano, aumentandone il diametro in superficie (stadio 3). Con la continuazione del processo, si può avere coalescenza tra varie forme. - *Mudhole development at the western shore of the Dead Sea (modified after ARKIN & GIRAT, 2000): subsurface erosion begins in gravel or salt crystal layers where laminated flow becomes turbulent. A hollow and pipe form upwards. Subsidence begins at the surface (Stage 1). Subsidence continues with concentric fractures at the surface forming a typical funnel shape. Fines are washed out at the base of the pipe (Stage 2). Walls at the surface collapse increasing diameter of hole. As process continues several holes may coalesce (Stage 3).*

no i lavori di ABELSON *et alii* (2006) e YECHIELI *et alii* (2006) hanno evidenziato come l'elevato sviluppo di sinkholes da crollo sia da mettere in relazione alla presenza di un livello di sale nel sottosuolo, spesso alcuni metri e posto a profondità superiore ai 20 m dal piano campagna. Le acque sotterranee sottosature determinano fenomeni di dissoluzione in tale livello (YECHIELI, 2000), con formazione di cavità, i cui crolli successivi portano alla genesi di sinkholes. Da evidenziare il ruolo svolto dalle faglie attive, lungo le quali l'acqua trova la sua via di accesso al livello salino (Abelson *et alii*, 2003).

Sul versante giordano, dopo lo studio di TAQIEDDIN *et alii* (2000), CLOSSON *et alii* (2005) e CLOSSON & KARAKI (in stampa) hanno esaminato i fenomeni di subsidenza e i sinkholes del Mar Morto (Fig 13): tali fenomeni si sono sviluppati in zone emerse di recente a seguito dell'intensa attività di emungimento (protrattasi per almeno un

quarantennio, da parte sia degli israeliani che dei giordani) delle acque superficiali e sotterranee. Gli Autori cercano di pervenire alla possibilità di individuare le aree suscettibili a fenomeni di sinkholes, e di svolgere su di esse un monitoraggio continuo, attraverso un approccio integrato che prevede l'utilizzo di indagini geofisiche (gravimetria di alta precisione) e tecniche di telerilevamento (analisi di interferogrammi radar differenziali).

IRAN

In Iran sono segnalate alcune interessanti situazioni di sinkholes: KHORSANDI & MIYATA (2007) illustrano alcuni casi nella valle di Lar, a nord-est della capitale Teheran, nelle montagne di Alborz. La locale successione stratigrafica è costituita da calcari del Giurassico, da massivi a sottilmente stratificati, intensamente fratturati e interessati da carsismo; al di sopra, vi è una copertura quaternaria costituita da lave trachitiche e trachi-andesiti-

che, e da alluvioni recenti. Nell'area retrostante la diga di Lar sono stati individuati nove sinkholes, quattro dei quali apertisi nel periodo 1980-89 nei sedimenti di riempimento del bacino artificiale, mentre i restanti sono più antichi e interessano i depositi alluvionali grossolani. Profondi sino a un massimo di 23 m, i sinkholes appaiono allineati lungo faglie appartenenti ai principali sistemi tettonici individuati nell'area (KHORSANDI & MIYATA, 2007).

Altra area di notevole interesse è quella dei Monti Zagros, nell'Iran sud-occidentale, dove alcuni studi a carattere carsico (BOSAK *et alii*, 1999; CUCCHI & ZINI, 2003) hanno segnalato sinkholes di varia tipologia e dimensione, che però non sono stati finora oggetto di specifiche e più dettagliate ricerche.

ORIENTE

In Oriente, la letteratura scientifica internazionale riporta essenzialmente situazioni di subsidenza nell'ambito di depositi alluvionali del Quaternario, derivanti da eccessivi emungimenti delle acque sotterranee. I casi di Shangai (TANG *et alii*, 2007) e del delta dello Yangtse, in Cina (ZHANG *et alii*, 2007), e quello di Semarang, in Indonesia (MARFAI & KING, 2007) sono tra i più noti e meglio studiati. Meno attenzione sembra essere rivolta a eventi naturali di sprofondamento, ma ciò potrebbe derivare dalla mancata pubblicazione in lingua inglese degli studi sulla materia.

AFRICA

Le complesse sequenze vulcaniche del Terziario e del Quaternario del Kenya meridionale, e le sovrastanti coperture derivanti dall'erosione delle stesse rocce ignee, sono interessate da sinkholes che di frequente si allineano lungo le prevalenti linee di faglia. I sinkholes derivano dall'erosione sotterranea nei depositi non consolidati superficiali, che determina la formazione di veri e propri canali in cui si sviluppa un flusso turbolento di corsi d'acqua sotterranei (NGECU & NYAMBOK, 2000). L'ampliamento di tali canali provoca, infine, il collasso della

parte superficiale e la formazione dei sinkholes (Fig. 13). I frequenti casi hanno determinato nell'area alcune vittime, la distruzione di insediamenti rurali e danni a infrastrutture.

Nell'Africa settentrionale, doline da crollo sono descritte da EL KHALKI & AKDIM (2001) nei Monti dell'Atlante, in Marocco: esse coinvolgono varie litologie, dal substrato carbonatico ai depositi alluvionali di copertura, e presentano dimensioni variabili, con profondità da 2 a 45 m, e diametro da 5 a 90 m.

Se si escludono poi le numerose situazioni di sinkholes connessi ad attività antropica, tipo le miniere del Sud Africa (DE BRUYN & BELL, 2001; SWART & VAN SCHALWYK, 2001; BELL *et alii*, 2002), specifici lavori dedicati all'argomento e relativi ad altri paesi africani non sono diffusi nelle principali riviste internazionali del settore. Sono però segnalati casi di sinkholes connessi, ad esempio, a fenomeni di intensa erosione in Madagascar: uno dei principali elementi del paesaggio, su ampi settori dell'isola malgascia, è infatti costituito dai lavakas, profondi solchi di erosione all'interno delle successioni saprolitiche, derivanti da intensa alterazione di rocce ignee (WELLS & ANDRIAMIHAJA, 1993; PARISE *et alii*, 2005). In cor-



Fig. 13. Veduta aerea di sinkholes allagati nel Mar Morto, area di Ein Gedi. La parte alta dell'immagine è interessata da forte subsidenza, con forma da circolare a ellittica, delineata da fratture circolari, e con all'interno la presenza di vari sinkholes. Questo tipo di strutture composte è osservabile in più siti lungo la costa del Mar Morto, con l'esempio di maggiori dimensioni (500 x 300 m) in Giordania. Fonte: Internet, DAVID HOLLAND, 2005; fornita da D. CLOSSON). - *Bird's eye view of flooded sinkholes in the Dead Sea, Ein Gedi area. The upper part of the picture shows strong subsidence with a circular to elliptical shape delineated by circular cracks. Sinkholes are proliferating inside. Such compound features can be found in many places along the coast. The biggest elliptical structures can be found in Jordan where they reach 500 m x 300 m. Source: the Internet, DAVID HOLLAND, 2005.*

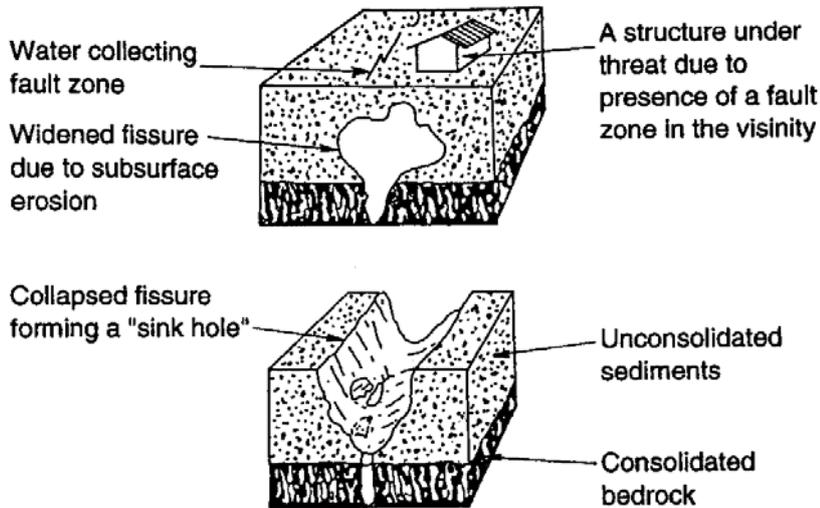


Fig. 14. Sviluppo di sinkholes in depositi del Kenya meridionale (da NGEUCU & NYAMBOK, 2000), come risultato di erosione sotterranea. - *Development of sinkholes as a result of subterranean erosion (after NGEUCU & NYAMBOK, 2000).*

rispondenza di alcuni lavakas, in superficie si aprono ampie depressioni tipo sinkholes, create dalla presenza di cavità, anche esplorabili dall'uomo (Fig. 14; VAN DER SCHUIT & LAUMANN, 2004), derivanti dall'erosione ad opera delle acque sotterranee.

CONCLUSIONI

La presente trattazione, relativa a casi di sinkholes in vari contesti geologici e morfologici, ha evidenziato la notevole diffusione delle fenomenologie in questione, e gli effetti non secondari che ne

possono derivare per l'ambiente antropizzato. Le attività dell'uomo, sia in essere che future, non possono prescindere dal considerare la possibilità di questi eventi.

Il crescente sviluppo dell'urbanizzazione in aree potenzialmente interessate dal verificarsi di sinkholes determina la necessità di comprendere al meglio le caratteristiche idrogeologiche e la funzionalità dell'ambiente carsico e degli altri contesti dove è probabile il verificarsi di sinkholes, al fine di limitare i danni derivanti sia da pericoli naturali (inondazioni, allagamenti, apertura di nuovi sinkholes, ecc.; HYATT & JACOBS, 1996; TOLMACHEV & LEONENKO, 2005; ZHOU, 2007) che da quelli antropici di varia natura (PANTZARTZIS *et alii*, 1993; MILANOVIC, 2002). Risulta quindi indispensabile procedere, preventivamente a qualsiasi opera che insista sull'ambiente carsico, ad approfondite indagini sulla

presenza eventuale di sinkholes e sulle loro modalità di assorbimento idrico (ZHOU *et alii*, 2000; ZHOU & BECK, 2005).

Nonostante la ormai ampia casistica esistente in letteratura (solo parzialmente analizzata in questo contributo, e che ben evidenzia l'importanza di studi preventivi, anche in termini di risparmio economico per la società civile), viene tuttavia dato ancora scarso rilievo a tali ricerche, che meriterebbero invece una ben maggiore attenzione da parte di coloro che sono preposti a gestire territori potenzialmente interessati dallo sviluppo di sinkholes.

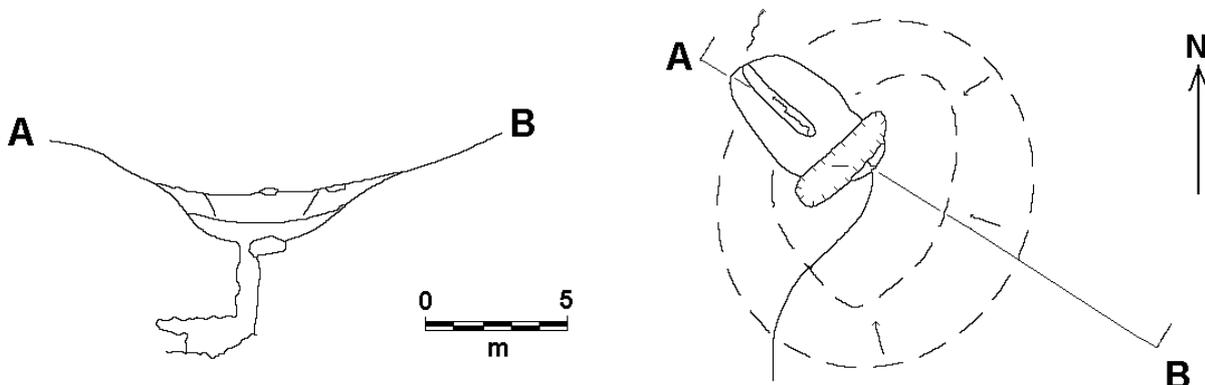


Fig. 15. Sezione e planimetria di una cavità esplorata alla base di un lavaka nella zona di Bemaraha (semplificata, da LAUMANN & GEBAUER, 1993). In superficie, l'accesso alla cavità avviene attraverso un netto sinkhole. - *Section and plan of a cave explored at the base of a lavaka in the Bemaraha area (simplified, after LAUMANN & GEBAUER, 1993).*

RINGRAZIAMENTI

Damien Closson ha gentilmente fornito le immagini dei sinkholes del Mar Morto, riportate nelle figure 10 e 13.

BIBLIOGRAFIA

- ABELSON M., YECHIELI Y., CROUVI O., BAER G., WACHS D., BEIN A. & SHITVELMAN V. (2006) Evolution of the Dead Sea sinkholes. In: Enzel Y., Agnon A. & Stein M. (Eds.) *New frontiers in Dead Sea paleoenvironmental research*. Geological Society of America, sp. paper 401, 241-253.
- ALIAJ S., BALDASSARRE G. & SHKUPI D. (2001) Quaternary subsidence zones in Albania: some case studies. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 59, 313-318.
- AL-RIFA'IY I.A. (1990) Land subsidence in the Al-Dahr residential area in Kuwait: a case history study. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 23, 337-346.
- AMIN A.A. & BANKHER K.A. (1997) Karst hazard assessment of eastern Saudi Arabia. *Natural Hazards*, 15, 21-30.
- ANDREJCHUK V. (1996) The Bereznikovsky collapse. *Geoekologia*, 1, 17-34 (in russo).
- ANDREJCHUK V. (2002) Collapse above the world's largest potash mine (Ural, Russia). *International Journal of Speleology*, 31 (1/4), 137-158.
- ANDREJCHUK V. & KLIMCHOUK A. (2002) Mechanisms of karst breakdown formation in the gypsum karst of the fore-Ural region, Russia (from observations in the Kungurskaja cave). *International Journal of Speleology*, 31 (1/4), 89-114.
- ANGEL J.C., NELSON D.O. & PANNO S.V. (2004) Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: an example from Illinois' sinkhole plain. *Journal of Cave and Karst Studies*, 66 (1), 9-17.
- APPLEGATE P. (2003) Detection of sinkholes developed on shaly Ordovician limestones, Hamilton County, Ohio, using digital topographic data: dependence of topographic expression of sinkholes on scale, contour interval, and slope. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65 (2), 126-129.
- ARAUZO T. & GUTIERREZ F. (1995) Fenómenos recientes de subsidencia karstica sin-sedimentaria en el Barranco de Torrecilla (Depresión del Ebro, Zaragoza). *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 9 (1-2), 73-90.
- ARKIN Y. & GILAT A. (2000) Dead Sea sinkholes – an ever-developing hazard. *Environmental Geology*, 39 (7), 711-722.
- BATES R.L. & JACKSON J.A. (1987) - *Glossary of geology*. American Geological Institute, 3rd edition, 788 pp.
- BECK B.F. (Ed.) (1999) Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst. *Engineering Geology*, 52 (1-2).
- BECK B.F. (2002) The Karst Conferences, consulting report as science, and geophysical pitfalls. *Engineering Geology*, 65 (2-3), 81-83.
- BECK B.F. (2005) Soil piping and sinkhole failures. In: Culver D.C. & White W.B. (Eds.) *Encyclopedia of caves*. Elsevier, 521-526.
- BELL F.G., DE BRUYN I.A. & STACEY T.R. (2002) Some examples of the impact of metalliferous mining on the environment: a South African perspective. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 61, 1-20.
- BENITO FERRANDEZ G. (1987) Karstificación y colapsos karsticos en los yesos del sector central de la Depresión del Ebro (Aragón, España). *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 1, 61-76.
- BENITO G., PÉREZ DEL CAMPO P., GUTIERREZ ELORZA M. & SANCHO C. (1995) Natural and human-induced sinkholes in gypsum terrain and associated environmental problems in NE Spain. *Environmental Geology*, 25, 156-164.
- BOATWRIGHT B.A., & ALLMAN D.W. (1979) *The occurrence and development of Guest Sink, Hernando County, Florida*. Unknown Publisher, 13 pp.
- BOSAK P., BRUTHANS J., FILIPPI M., SVOBODA T. & SMID J. (1999) Karst and caves in salt diapirs, SE Zagros Mts. (Iran). *Acta Carsologica*, 28 (2), 41-75.
- BREG M. (2007) Degradation of dolines on Logasko Polje (Slovenia). *Acta Carsologica*, 36 (2), 223-231.
- BRINKMANN R., PARISE M. & DYE D. (in stampa) Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough County, Tampa Bay area, Florida. *Engineering Geology*.
- BRINKMANN R., WILSON K., ELKO N., SEALE L., FLOREA L. J. & VACHER, H. L. (2007) Sinkhole distribution based on pre-development mapping in urbanized Pinellas County, Florida, USA. In: Parise M. & Gunn J. (Eds.) *Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis, and Mitigation*. Geological Society of London sp. publ. 279, 5-11.
- BROOKS R., FLOREA L., TURNER T. & PARISE M. (2006) Le voragini catastrofiche della Florida. *Speleologia*, 53, 56-62.

- BUZJAK N. (2000) Collapse structures as a connection between the karst surface and underground (examples from Croatia). *Acta Carsologica*, 29 (2), 65-81.
- CALIC-LJUBOJEVIC J. & LJUBOJEVIC V. (2000) Caves below collapse dolines – case study of Tisova Jama (Eastern Serbia). *Acta Carsologica*, 29 (2), 95-101.
- CAR J. (2001) Structural basis for shaping of dolines. *Acta Carsologica*, 30 (2), 239-256.
- CARAMANNA G. (2002) Le porte dell'acqua. *Speleologia*, 46, 32-39.
- CLOSSON D. & KARAKI N.A. (in stampa) Human-induced geological hazards along the Dead Sea coast. *Environmental Geology*.
- CLOSSON D., KARAKI N.A., KLINGER Y. & HUSSEIN M.J. (2005) Subsidence and sinkhole hazard assessment in the Southern Dead Sea area, Jordan. *Pure and Applied Geophysics*, 162, 221-248.
- COOLEY T. (2002) Geological and geotechnical context of cover collapse and subsidence in mid-continent US clay-mantled karst. *Environmental Geology*, 42, 469-475.
- COOPER A.H. (1986) Subsidence and foundering of strata caused by the dissolution of Permian gypsum in the Ripon and Bedale areas, North Yorkshire. In: Harwood G.M. & Smith D.B. (Eds.) *The English Zechstein and related topics*. Geological Society of London sp. publ. 22, 127-138.
- COOPER A.H. (1988) Subsidence resulting from the dissolution of Permian gypsum in the Ripon area: its relevance to mining and water abstraction. In: Bell F.G., Culshaw M.G., Cripps C.J. & Lovell M.A. (Eds.) *Engineering geology of underground movements*. Geological Society of London, *Engineering Geology* sp. publ. 5, 387-390.
- COOPER A.H. (2005) Case study # 1. Remediation of a sinkhole over gypsum at Ripon, U.K. In: Waltham T., Bell F. & Culshaw M., *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer, Berlin, 272-276.
- COOPER A.H. & SAUNDERS J.M. (2002) Road and bridge construction across gypsum karst in England. *Engineering Geology*, 65, 217-223.
- CUCCHI F. & ZINI L. (2003) Gypsum karst of Zagros Mountains (I.R. Iran). *Acta Carsologica*, 32 (1), 69-82.
- CVIJIC J. (1893) *Dar karstphänomen*. Geogr. Abh. Von A. Penck, 5, 215-319.
- DE BRUYN I.A. & BELL F.G. (2001) The occurrence of sinkholes and subsidence depressions in Far West Rand and Gauteng province, South Africa, and their engineering implications. *Environmental & Engineering Geoscience*, 7 (3), 281-295.
- DOBECKI T.L. & UPCHURCH S.B. (2006) Geophysical applications to detect sinkholes and ground subsidence. *The Leading Edge*, 25, 336-341.
- DOGAN U. & CICEK I. (2002) Occurrence of cover-collapse sinkholes (cover-collapse dolines) in the May Dam reservoir area (Konya, Turkey). *Cave and Karst Science*, 29 (3), 111-116.
- DOROFEEV E.P. & ANDREJCHUK V.N. (1990) *The Kungurskaya Ice Cave*. Perm, 303 pp. (in russo).
- DOUGHERTY P. (2005) Case study # 7. Sinkhole destruction of Corporate Plaza, Pennsylvania. In: Waltham T., Bell F. & Culshaw M., *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer, Berlin, 304-308.
- EDMONDS C. (2005) Case study # 8. Subsidence over a chalk pipe at Chalfont St. Peter, U.K. In: Waltham T., Bell F. & Culshaw M., *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer, Berlin, 309-312.
- EFTIMI R. & TAFILAJ I. (1999) Preliminary assessment of the possible land subsidence in Turani well field – Korca city. Proc. UNESCO-BAS Int. Project “Expert assessment of Land Subsidence Related to Hydrogeological and Engineering Geological Conditions in the Regions of Sofja, Skopje and Tirana”, 4th Working Group Meeting, 75-81.
- EL KHALKI Y. & AKDIM B. (2001) Les dolines d'effondrement et les dolines-lacs des Causses du SW du Moyen Atlas (Maroc). *Karstologia*, 38 (2), 19-24.
- EPSTEIN J.B. (2000) Gypsum-karst collapse in the Black Hills, South Dakota-Wyoming, USA. *Acta Carsologica*, 29 (2), 103-122.
- FAIRBRIDGE R.W. (1968) *The encyclopedia of geomorphology*. Reinhold, New York.
- FLOREA L.J. (2005) Using state-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structure. *Journal of Cave and Karst Studies*, 67 (2), 120-124.
- FLOREA L.J. (2006) The morphology of air-filled caves within the karst of the Brooksville Ridge, west-central Florida. *Journal of Cave and Karst Studies*, 68 (2), 64-75.
- FLOREA L.J., PAYLOR R.L., SIMPSON L. & GULLEY J. (2002) Karst GIS advances in Kentucky. *Journal of Cave and Karst Studies*, 63, 58-62.
- FLORIDA OFFICE OF INSURANCE REGULATION

(2006) Review of Florida Sinkhole Insurance P r o p o s a l .
http://www.florir.com/pdf/DeloitteSinkhole_092006Final.pdf

FORTH R.A., BUTCHER D. & SENIOR R. (1999) Hazard mapping of karst along the coast of the Algarve, Portugal. *Engineering Geology*, 52, 67-74.

GALLOWAY D., JONES D.R. & INGEBRITSEN S.E. (1999) Land Subsidence in the United States. U.S. Geological Survey Circular 1182, 177 pp.

GAMS I. (1973) Slovene karst terminology. *Zveza Geografikih Institutij Jugoslavije*, Knjiga 1, Ljubljana, 78 pp.

GAMS I. (2000) Doline morphogenetic processes from global and local viewpoints. *Acta Carsologica*, 29 (2), 123-138.

GAO Y. & ALEXANDER JR E.C. (2003) A mathematical model for a sinkhole probability map in Fillmore County, Minnesota. In: Beck B.F. (Ed.), *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst*. Proc. 9th Multidisc. Conf., Huntsville (Alabama), ASCE Geotechn. Publ. 122, 439-449.

GAO Y., ALEXANDER JR E.C. & BARNES R.J. (2005) Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. *Environmental Geology*, 47, 1083-1098.

GARY M.O. & SHARP J.M. (2006) Volcanogenic karstification of Sistema Zacatón, Mexico. In: Harmon R.S. & Wicks C.W. (Eds.) *Perspectives on karst geomorphology, hydrology and geochemistry*. Geol. Soc. America sp. paper 404, 79-89.

GARY M.O., SHARP J.M., HAVENS R.S. & STONE W.C. (2003) Sistema Zacatón: identifying the connection between volcanic activity and hypogenic karst in a hydrothermal phreatic cave system. *Geo2*, 29 (3-4), 1-14.

GOODINGS D.J. & ABDULLA W.A. (2002) Stability charts for predicting sinkholes in weakly cemented sand over karst limestone. *Engineering Geology*, 65, 179-184.

GRACIA F.J. (1991) Criterios de clasificación morfométrica de campos de dolinas. *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 5, 65-76.

GREEN J.A., MARKEN W.J., ALEXANDER E.C. & ALEXANDER S.C. (2002) Karst unit mapping using geographic information system technology, Mower County, Minnesota, USA. *Environmental Geology*, 42 (5), 457-461.

GROSCH J.J., TOUMA F.T. & RICHARDS D.P. (1987) Solution cavities in the limestone of eastern Saudi Arabia. In: Beck B.F. & Wilson (Eds.), *Proc. 2nd Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Environmental Impacts of*

Karst in Karst Hydrology: Engineering and Environmental Applications, 73-78.

GUERRERO J., GUTIERREZ F. & LUCHA P. (2004a) Peligrosidad, daños y mitigación de inundaciones, subsidencia por disolución y movimientos de ladera en la localidad de Cadrete (Depresión del Ebro, Zaragoza). *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 19 (1-2), 63-82.

GUERRERO J., GUTIERREZ F. & LUCHA P. (2004b) Paleosubsidence 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.

GUNAY G. (2002) Gypsum karst, Sivas, Turkey. *Environmental Geology*, 42, 387-398.

GUTIERREZ F. (1996) Gypsum karstification induced subsidence: effects on alluvial systems and derived geohazards (Calatayud Graben, Iberian Range, Spain). *Geomorphology*, 16, 277-293.

GUTIERREZ F. (2003) El riesgo de dolinas de subsidencia en terrenos evaporíticos. *Historia Natural*, 3, 52-60.

GUTIERREZ F. & COOPER A.H. (2002) Evaporite dissolution subsidence in the historical city of Calatayud, Spain: damage appraisal and prevention. *Natural Hazards*, 25, 259-288.

GUTIERREZ F., CALAFORRA J.M., CARDONA F., ORTÍ F., DURAN J.J. & GARAY P. (2007) Geological and environmental implications of the evaporite karst in Spain. *Environmental Geology*, DOI 10.1007/s00254-007-0721-y.

GUTIERREZ-SANTOLALLA F., GUTIERREZ-ELORZA M., MARÍN C., DESIR G. & MALDONADO C. (2005) Spatial distribution, morphometry and activity of La Puebla de Alfindén sinkhole field in the Ebro river valley (NE Spain): applied aspects for hazard zonation. *Environmental Geology*, 48, 360-369.

HIGGINS C.G. & SCHONER C. (1997) Sinkholes formed by piping into buried channels. *Geomorphology*, 20, 307-312.

HOSE L.D. & PISAROWICZ J.A. (1999) Cueva de Villa Luz, Tabasco, Mexico: reconnaissance study of an active sulfur spring cave and ecosystem. *Journal of Cave and Karst Studies*, 61 (1), 13-21.

HYATT J.A. & JACOBS P.M. (1996) Distribution and morphology of sinkholes triggered by flooding following Tropical Storm Alberto at Albany, Georgia, USA. *Geomorphology*, 17, 305-316.

JOHNSON K.S. (1997) Evaporite karst in the United States. *Carbonates and Evaporites*, 12 (1), 2-14.

- JOHNSON K.S. (2005a) Case study # 11. Sinkholes and subsidence over salt at Wink, Texas. In: Waltham T., Bell F. & Culshaw M., Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer, Berlin, 321-325.
- JOHNSON K.S. (2005b) Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States. *Environmental Geology*, 48, 395-409.
- JOHNSON K.S. (2007) Evaporite karst problems and studies in the USA. *Environmental Geology*, DOI 10.1007/s00254-007-0716-8.
- KACAROGLU F., DEGIRMENCI M. & CERT O. (1997) Karstification in Miocene gypsum: an example from Sivas, Turkey. *Environmental Geology*, 30, 88-97.
- KAPPEL W.M., YAGER R.M. & MILLER T.S. (1999) The Restof Salt Mine Collapse. In: Galloway D., Jones D.R. & Ingebritsen S.E. (Eds.) *Land Subsidence in the United States*. U.S. Geological Survey Circular 1182, 177pp.
- KARACAN E. & YILMAZ I. (1997) Collapse dolines in Miocene gypsum: an example from Sivas (Turkey). *Environmental Geology*, 29, 263-266.
- KAUFMANN O. & QUINIF Y. (2002) Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the Tournaisis area, southern Belgium. *Engineering Geology*, 65, 117-124.
- KAUFMANN O. & DEUCESTER J. (2005) Case study # 16. Ground investigation in covered karst at Tournai, Belgium. In: Waltham T., Bell F. & Culshaw M., Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer, Berlin, 347-350.
- KHORSANDI A. & MIYATA T. (2007) Fault determination due to sinkhole array on Lar Valley, northeast of Tehran (Iran). *Acta Carsologica*, 36 (2), 203-208.
- KLIMCHOUK A.B. (1992) Large gypsum caves in the Western Ukraine and their genesis. *Cave Science*, 19 (1), 3-11.
- KLIMCHOUK A. (2000) Speleogenesis of the great gypsum mazes in the Western Ukraine. In: Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N. & Dreybrodt W. (Eds.) *Speleogenesis. Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society, 261-273.
- KLIMCHOUK A. (2007) Hypogene speleogenesis: hydrogeological and morphogenetic perspective. National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, NM, sp. paper 1, 106 pp.
- KLIMCHOUK A.B. & ANDREJCHUK V.N. (1996) Breakdown development in cover beds, and landscape features induced by intrastratal gypsum karst. *International Journal of Speleology*, 25 (3/4), 127-144.
- KLIMCHOUK A. & ANDREJCHUK V. (2002) Karst breakdown mechanisms from observations in the gypsum caves of the Western Ukraine: implications for subsidence hazard assessment. *International Journal of Speleology*, 31 (1/4), 55-88.
- KOUTEPOV V.M., MIRONOV O.K. & TOLMACHEV V.V. (2007) Assessment of suffo-sion-related hazards in karst areas using GIS technology. *Environmental Geology*, DOI 10.1007/s00254-007-0888-2.
- KRUSE S., GRASMUECK M., WEISS M. & VIGGIANO D. (2006) Sinkhole structure mapping in covered karst terrain. *Geophysical Research Letters*, 33, L16495 DOI 10.1029/2006GLO16975.
- 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.
- LAUMANN M. & GEBAUER H.D. (1993) Namoroka 1992: expedition to the karst of Namoroka and Narinda, Madagascar. *The International Caver*, 6, 30-36.
- MALDONADO C., GUTIERREZ SANTOLALLA F., GUTIERREZ ELORZA M. & DESIR G. (2000) Distribución espacial, morfometría y actividad de la subsidencia por disolución de evaporitas en un campo de dolinas de colapso (Valle del Ebro, Zaragoza). *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 14 (3-4), 9-24.
- MARFAI M.A. & KING L. (2007) Monitoring land subsidence in Semarang, Indonesia. *Environmental Geology*, DOI 10.1007/s00254-007-0680-3.
- MARTIN CRESPO T. & GOMEZ ORTIZ D. (2007) Collapse hazard assessment in evaporite materials from ground penetrating radar: a case study. *Environmental Geology*, 53, 57-66.
- MARTINEZ J.D., JOHNSON K.S. & NEAL J.T. (1998) Sinkholes in evaporite rocks. *American Scientist*, 86, 38-51.
- MC DOWELL P.W. (1989) Ground subsidence associated with doline formation in chalk areas of southern England. In: Beck B.F. (Ed.), *Engineering and Environmental Impacts of Sinkholes and Karst*. Balkema, 129-134.
- MC DOWELL P.W. (2005) Case study # 9. Geophysical investigations of sinkholes in chalk, U.K. In: Waltham T., Bell F. & Culshaw M., Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer, Berlin, 313-316.

- MC DOWELL P.W. & POULSON A.J. (1996) Ground subsidence related to dissolution of chalk in southern England. *Ground Engineering*, 29 (2), 29-33.
- MILANOVIC P. (2002) Subsidence hazards as a consequence of dam, reservoir and tunnel construction. *International Journal of Speleology*, 31 (1/4), 169-180.
- NEAL J. (2005) Case study # 14. Sinkhole remediation over Weeks Island salt, Louisiana. In: Waltham T., Bell F. & Culshaw M., *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer, Berlin, 336-340.
- NEAL J.T. & MYERS R.E. (1995) Origin, diagnostics, and mitigation of a salt dissolution sinkhole at the US Strategic Petroleum Reserve storage site, Weeks Island, Louisiana. *International Association Hydrological Science Publication* 234, 187-195.
- NEAL J.T., COLPITTS R.M. & JOHNSON K.S. (1998) Evaporite karst in the Holbrook Basin, Arizona. In: Borchers J.W. (Ed.) *Land subsidence: case studies and current research*. *Ass. Eng. Geologists*, sp. publ. 8, 373-384.
- NGECU W.M. & NYAMBOK I.O. (2000) Ground subsidence and its socio-economic implications on the population: a case study of the Nakuru area in central Rift Valley, Kenya. *Environmental Geology*, 39 (6), 567-574.
- ORNDORFF R.C. & LAGUEUX K.M. (2000) Using geographic information systems (GIS) to determine geologic controls on the distribution of sinkholes in the Ozarks of south-central Missouri. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 32 (3), 38.
- ORNDORFF R.C., WEARY D.J. & LAGUEUX K.M. (2000) Geographic information systems analysis of geologic controls on the distribution of dolines in the Ozarks of south-central Missouri, USA. *Acta Carsologica*, 29 (2), 161-175.
- PANTZARTZIS P., EMMANUILIDIS G., KRAPP A. & MILANOVIC P. (1993) Karst phenomena and dam construction in Greece. In: Gunay G., Johnson I. & Back B. (Eds.) *Hydrogeological processes in karst terrains*. IAHS publ. 207, 65-74.
- PARISE M. & PASCALI V. (2003) Surface and subsurface environmental degradation in the karst of Apulia (southern Italy). *Environmental Geology*, 44, 247-256.
- PARISE M. & GUNN J. (Eds.) (2007) *Natural and anthropogenic hazards in karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society of London, sp. publ. 279, 202 pp.
- PARISE M., QIRIAZI P. & SALA S. (2004) Natural and anthropogenic hazards in karst areas of Albania. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 569-581.
- PARISE M., QIRIAZI P. & SALA S. (2007) Evaporite karst of Albania: main features and cases of environmental degradation. *Environmental Geology*, DOI 10.1007/s00254-007-0722-x.
- PARISE M., CALCATERRA D., CAPUTO P., DE PIPPO T., LANGELLA A., MELLUSO L. & MORRA V. (2005) Erosion and mass movements in saprolitic soils of Madagascar. *Geophysical Research Abstract*, 7, 03028.
- PARKER J.W. (1992) Surficial aquifer hydrogeology in a covered-karst terrane. MS Thesis, University of South Florida, Tampa, Florida, 228 pp.
- PAUKSTYS B. (2005) Case study # 13. Agriculture on sinkhole karst on gypsum, Lithuania. In: Waltham T., Bell F. & Culshaw M., *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*. Springer, Berlin, 331-335.
- PEREZ AGUILAR J. & GONZALEZ HERRERA R. (2002) Contribución del espeleobuceo al conocimiento de la morfología karstica de la planicie del norte del estado de Yucatán, Mexico. In: Carrasco F., Durán J.J. & Andreo B. (Eds.), *Karst and environment*. Fundación Cueva de Nerja, 289-294.
- QIRIAZI P. (2001) *Gjeografia fizike ë Shqiperise*. Aferdita, Tirane, 367 pp.
- QIRIAZI P., SALA S., CARA G., PARISE M. & TROCINO A. (2005) Environmental degradation of evaporite karst in Albania and Italy. *Geophysical Research Abstract*, 7, 01568.
- QUINLAN J.F., SMITH R.A. & JOHNSON K.S. (1986) Gypsum karst and salt karst of the United States of America. *Le Grotte d'Italia*, 13, 73-92.
- RODRIGUEZ VIDAL J. (1986) Deformaciones recientes en los depositos cuaternarios de la Puebla de Alfindén (Zaragoza). *Boletín Geológico y Minero*, 97 (1), 3-8.
- SALA S. & PARISE M. (2006) Facing environmental problems in karst areas of developing countries: the case study of Dajti – Mali me Gropa (Albania). *Geophysical Research Abstract*, 8, 01365.
- SAURO U. (2003) Dolines and sinkholes: aspects of evolution and problems of classification. *Acta Carsologica*, 32 (2), 41-52.
- SAURO U. (2005) Closed depressions. In: Culver D.C. & White W.B. (Eds.) *Encyclopedia of caves*. Elsevier, 108-122.
- SCHEIDT J., LERCHE I. & PALEOLOGOS E. (2005) Environmental and economic risks from sinkholes in west-central Florida. *Environmental Geosciences*, 12, 207-217.
- SEBELA S. & CAR J. (2000) *Velika Jersanova*

doline – a former collapse doline. *Acta Carsologica*, 29 (2), 201-212.

SIMÓN J.L., SORIANO M.A., GRACIA J. & SALVADOR T. (1991) Dolinas aluviales en las terrazas del Ebro al oeste de Zaragoza: un análisis empírico de los factores de riesgo. *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 5, 139-148.

SIMÓN J.L., SORIANO M.A., ARLEGUI L.E., GRACIA J., LIESA C.L. & POCOVÌ A. (2007) Spacetime distribution of ancient and active alluvial karst subsidence: examples from the central Ebro Basin, Spain. *Environmental Geology*, DOI 10.1007/s00254-007-0732-8.

SINCLAIR W.C., STEWART J.W., KNUTILLA R.L., GILBOY A.E. & MILLER R.L. (1985) Types, features, and occurrence of sinkholes in the karst of West-Central Florida. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 85-4126, 81 pp.

SORIANO A. (1986) Dolinas de disolución normal y dolinas aluviales en el sector centro-meridional de la Depresión del Ebro. *Boletín Geológico y Minero*, 97 (3), 328-337.

SORIANO M.A. & SIMÓN J.L. (2002) Subsidence rates and urban damages in alluvial dolines of the central Ebro Basin (NE Spain). *Environmental Geology*, 42, 476-484.

STEPISNIK U. (2004) The origin of sediments inside the collapse dolines of Postojna karst (Slovenia). *Acta Carsologica*, 33 (1), 237-244.

SUSTERSIC F. (2002) Collapse dolines and deflector faults as indicators of karst flow corridors. *International Journal of Speleology*, 31 (1/4), 115-127.

SWART C.J.U. & VAN SCHALWYK A. (2001) Subsurface grout barriers for ground stabilization in dolomite areas near Carletonville, South Africa. *Environmental Geology*, 40 (4-5), 592-601.

TAMINSKAS J. & MARCINKEVICIUS V. (2002) Karst geoindicators of environmental change: the case of Lithuania. *Environmental Geology*, 42, 757-766.

TANG Y.Q., CUI Z.D., WANG J.X., YAN L.P. & YAN X.X. (2007) Application of grey-theory based model to prediction of land subsidence due to engineering environment in Shanghai. *Environmental Geology*, DOI 10.1007/s00254-007-1009-y.

THARP T.M. (1999) Mechanics of upward propagation of cover-collapse sinkholes. *Engineering Geology*, 52, 23-33.

THARP T.M. (2002) Poroelastic analysis of cover-collapse sinkhole formation by piezometric surface drawdown. *Environmental Geology*, 42, 447-456.

TIHANSKY A.B. (1999) Sinkholes, West-

Central Florida. In: Galloway D., Jones D.R. & Ingebritsen S.E. (Eds.) *Land Subsidence in the United States*. U.S. Geological Survey Circular 1182, 177 pp.

TOLMACHEV V.V. & LEONENKO M.V. (2005) Classification of karstic terrains based on sinkhole risk. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 42 (2), 52-55.

UPCHURCH S.B. & RANDAZZO A.F. (1997) Environmental geology of Florida. In: Randazzo A.F. & Jones D.S. (Eds.) *The Geology of Florida*. University Press of Florida, Gainesville, 217-249.

VAN DER SCHUIT S. & LAUMANN S. (2004) Madagascar 1991/92 and 2003 (Bemaraha, Namoroka and Narinda). *Berliner Höhlenkundliche Berichte*, 13, 72 pp.

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. I.T.C., Enschede, 211 pp.

WALTHAM T. (2002) Gypsum karst near Sivas, Turkey. *Cave and Karst Science*, 29 (1), 39-44.

WALTHAM A.C. & FOOKES P.G. (2003) Engineering classification of karst with respect to the role and influence of caves. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 101-118.

WALTHAM T., BELL F. & CULSHAW M. (2005) Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction. Springer, 382 pp.

WEARY D.J. & ORNDORFF R.C. (2001) Physical controls on karst features in the Ozark Plateaus of Missouri, U.S.A., as determined by multivariate analyses in a Geographic Information System (GIS). *Acta Carsologica*, 30 (2), 181-194.

WELLS N.A. & ANDRIAMIHAJA B. (1993) The initiation and growth of gullies in Madagascar: are humans to blame? *Geomorphology*, 8, 1-46.

WILLIAMS P.W. (2003) Dolines. In: Gunn J. (Ed.) *Encyclopedia of caves and karst science*. Fitzroy Dearborn, New York, 304-310.

WILSON W.L. (1988) The potential depth of underwater caves in the Orlando area. *Underwater Speleology*, 15 (4), 6-8.

YECHIELI Y., ABELSON M., BEIN A., CROUVI O. & SHITVELMAN V. (2006) Sinkhole "swarms" along the Dead Sea coast: reflection of disturbance of lake and adjacent groundwater systems. *Geological Society of America Bulletin*, 118 (9), 1075-1087.

ZHANG Y., XUE Y.Q., WU J.C., YU J., WEI Z.X. & LI Q.F. (2007) Land subsidence and earth fissures due to groundwater withdrawal in the Southern Yangtze Delta, China. *Environmental*

Geology, DOI 10.1007/s00254-007-1028-8.

ZHOU W. (2007) Drainage and flooding in karst terranes. *Environmental Geology*, 51, 963-973.

ZHOU W. & BECK B.F. (2005) Roadway construction in karst areas: management of stormwater runoff and sinkhole risk assessment. *Environmental Geology*, 47, 1138-1149.

ZHOU W., BECK B.F. & STEPHENSON J.B. (2000) Reliability of dipole-dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terrane. *Environmental Geology*, 39 (7), 760-766.