

I *sinkholes*: problemi terminologici, meccanismi genetici, classificazione

The sinkholes: terminological problems, genetic mechanisms, classification

NISIO S. (*)

1. - INTRODUZIONE

Nell'ultimo ventennio sono stati registrati, in aree di pianura italiane, fenomeni di sprofondamento naturale ed improvviso che hanno dato origine a voragini generalmente di forma sub-circolare di diametro variabile da alcuni metri a poche centinaia di metri.

Questi fenomeni sono noti in letteratura con il termine "*sinkhole*".

I *sinkholes* erano conosciuti già in epoca romana (riferimenti sono presenti negli scritti di Plinio il Giovane e di Vitruvio, risalenti al I sec. a.C., nel "*De Prodigis*" di Giulio Obsequente, e successivamente nei lavori di Dionigi di Alicarnasso, e di Livio nel 550 d.C.) e medioevale in molte regioni italiane; ad essi sono state attribuite differenti denominazioni dialettali che dimostrano la vasta diffusione del fenomeno: *obico*, *sprofondo* o *sprofonno*, *ovizzo*, *obizzzo* (che ricordano la parola *aviso* o *aiso* che vuol dire dolina in dialetto salentino), *sprugola* (in dialetto ligure), *gorgo* (in dialetto siciliano, romagnolo e veneto), *occhio pollino* (in dialetto lombardo) *commole*, *piscine*, *fosse*, *tonzi* o *occhi d'acqua*, *sparafunni*, *puri* o *putei* (in dialetto campano), *gurgbi* o *puli* nei dialetti dell'area centro-settentrionale ed in dialetto pugliese.

Su alcuni si narrano leggende che ne farebbero risalire l'origine ad un improvviso evento catastrofico.

Le forme relitte di tali sprofondamenti sono assimilabili a depressioni sub-circolari, con diametro e profondità variabile, spesso obliterate, o a piccoli laghi.

Gli sprofondamenti avvenuti negli ultimi anni sono stati segnalati e tenuti sotto osservazione dagli Enti locali, monitorando, in tal modo, la loro evoluzione ed effettuando una gran numero di indagini specifiche (geologiche, geofisiche, geognostiche). Tali studi hanno portato all'interpretazione dei meccanismi genetici che molto spesso non coincidono con i classici schemi, relativi ai processi carsici ma, a causa del notevole spessore della copertura sedimentaria, possono collegarsi a fenomeni di erosione dal basso (*deep piping*) di cui si parlerà ampiamente in seguito: a tali fenomeni è stato dato il nome di *deep piping sinkhole* (sprofondamento improvviso connesso alla risalita di fluidi e all'erosione dal basso) (NISIO, 2003; NISIO *et alii*, 2005; APAT, 2004).

Sono state censite inoltre sul territorio italiano alcune voragini o fosse subcircolari di genesi poco chiara, definite, da diversi autori *forme crateriche* o *pseudo crateriche*. Alcune si rilevano in aree vulcaniche e quindi sono state attribuite in passato a fenomeni vulcanici (*maar*, o piccoli crateri)

(*) ISPRA - Dipartimento Difesa del Suolo - Servizio Geologico d'Italia - Servizio Geologia Applicata e Idrogeologia.

altre, presenti in aree pianeggianti nelle vicinanze di dorsali carbonatiche, attribuite a fenomeni carsici profondi (doline alluvionali), altre ancora ad attività antropiche (cave, miniere, anfiteatri romani, voragini dovute ad esplosioni etc.).

Inoltre, distribuiti in molte regioni italiane, sono presenti numerosi laghi di piccolo diametro di forma sub-circolare originatisi in epoca storica, le cui modalità di formazione, morfologia e contesto geologico-strutturale potrebbero essere compatibili con fenomenologie da *sinkhole*.

Stabilire quali dei numerosi piccoli laghi, polle sub-circolari o delle depressioni asciutte, presenti nel territorio italiano, possano essere assimilati a tale tipologia di sprofondamento è difficile, e la veridicità di tali ipotesi può venire confermata solo attraverso indagini specifiche (ricostruzioni geologiche, sondaggi geognostici, indagini geofisiche, analisi idrogeologiche e geochemiche).

Tuttavia spesso non è possibile effettuare tutte le indagini necessarie a causa dei costi troppo onerosi, e di conseguenza è possibile formulare soltanto ipotesi sulla genesi delle diverse fenomenologie. Il primo passo è comunque sicuramente quello di ricostruire l'assetto geologico-strutturale dell'area attraverso: raccolta di indagini eseguite da vari Enti, ricognizioni e osservazioni dirette sul terreno, dati di letteratura e ricerca storica.

La correlazione tra le depressioni colmate d'acqua e gli sprofondamenti catastrofici tipo *sinkhole* nasce dall'osservazione del fenomeno più frequente dopo la formazione di un *sinkhole*: il processo di "annegamento" della voragine. Nella maggior parte dei casi, infatti, le acque di infiltrazione si riversano al suo interno dando a questo la fisionomia di un piccolo lago di forma sub-circolare. In altri casi invece al fondo dello sprofondamento vi sono sorgenti, legate all'affioramento della falda che lo colmano rapidamente, nell'arco di pochi giorni, alimentandolo perennemente.

1.1. - ASPETTI TERMINOLOGICI

Nella letteratura nazionale ed internazionale si è diffuso da tempo l'utilizzo di numerosi termini per indicare i fenomeni di sprofondamento caratterizzati da diverse tipologie e meccanismi genetici di innesco (*dolina*, *cammino di collasso*, *limesink*, *cenotes*, *loess karst*, *voragine*, *sprofondamento*) generando una notevole confusione terminologica.

Attualmente, viene sempre più spesso utilizzato il termine *sinkhole*, introdotto per la prima volta come sinonimo di *dolina* da FAIRBRIDGE (1968) ed in seguito da MONROE (1970), per indicare le depressioni sub-circolari in area carsica. Nei prin-

cipali Glossari di Geologia si intende per *sinkhole* "una depressione circolare in area carsica".

Nonostante la semplicità della definizione riportata, il termine *sinkhole* è stato frequentemente utilizzato anche per indicare sprofondamenti connessi ad attività antropiche, che non si verificavano in ambiente carsico. La confusione terminologica è stata notevole, favorita anche dal maggiore utilizzo del termine *sinkhole* negli Stati Uniti (specialmente con significato ingegneristico o geologico-applicativo), di contro a una più frequente diffusione del sinonimo *dolina* in ambito europeo (maggiormente utilizzato per descrizioni geomorfologiche).

BECK, (1984), BECK & WILSON, (1987), BERTI *et alii*, (2002a), per esempio, utilizzano tale termine per indicare anche cavità, di forma non necessariamente sub-circolare, apertesi nel terreno per cause antropiche. Alcuni Autori, MONROE (1970), JENNINGS (1985), WHITE (1988), distinguono geneticamente i *sinkholes*, così come era stato fatto per le doline, in *solution sinkhole*, *collapse sinkhole* e *subsidence sinkhole* (coincidenti con i termini di *solution doline*, *collapse doline*, *subsidence doline* introdotti da CRAMER, 1941 e successivamente utilizzati da CASTIGLIONI nel 1986 in Italia e da molti altri Autori).

Attualmente però la letteratura anglosassone ed internazionale utilizza spesso il termine come sinonimo di alcuni particolari tipi di sprofondamenti in aree carsiche, che prevedono un evento di collasso improvviso catastrofico (*cover collapse doline* e *cave collapse doline*).

Nella letteratura italiana per indicare i vari tipi di cavità subcircolari sono stati utilizzati prevalentemente i termini classici di *dolina* (geneticamente distinta in alcuni tipi), *sprofondamento* e *cammino di collasso*.

In Italia il termine *sinkhole* è stato introdotto solo di recente, a partire dagli anni novanta (FACCENNA *et alii*, 1993; BRUNAMONTE *et alii*, 1994; NOLASCO, 1998; CIOTOLI *et alii*, 1998 e molti altri), ed è stato erroneamente adottato per indicare una sola tipologia di sprofondamenti di genesi incerta e non semplicemente dovuta a fenomeni carsici, con formazione di cavità di forma sub-circolare, che si aprono in maniera repentina, con richiamo di materiali verso il basso.

Successivamente è emerso che per queste forme il processo genetico principale è la risalita dei fluidi dal basso (LITTLEFIELD *et alii*, 1984; DERBYSHIRE & MELLORS, 1988; DERBYSHIRE *et alii*, 1991; BILLIARD *et alii*, 1992 1993; FACCENNA, 1993; MUXART *et alii*, 1994; CIOTOLI *et alii*, 2000; BERTI *et alii*, 2002a, b; NISIO 2003, NISIO *et alii*, 2005), attraverso reticoli di fratture che mettono in comunicazione un substrato carsificato con i sedimenti superficiali; in questo caso risultano rilevanti i

fenomeni di erosione anche profonda dal basso.

I meccanismi di erosione dal basso potrebbero essere assimilati a processi di *suffosione profonda*, dell'acqua nel terreno (con dimensioni granulometriche dalle argille alle ghiaie) che si realizza quando quest'ultimo è permeabile e quando l'acqua, abbondante e con pressione elevata, riesce a trovare vie di scorrimento in cui passare con velocità abbastanza sostenuta. Il passaggio dell'acqua provoca l'erosione di materiale e la formazione di canalicoli a sviluppo sub-orizzontale e di condotti tubolari lungo le linee idrauliche di flusso. Quest'ultimo fenomeno, in riferimento a fenomeni superficiali, viene indicato nella letteratura anglosassone con il termine *piping*, il meccanismo genetico potrebbe essere lo stesso ma con sviluppo di condotti più profondi ed essere chiamato *deep piping*.

La differenza sostanziale tra un *deep piping sinkhole* e una dolina è che, a differenza delle doline, nei *sinkholes* risultano preponderanti e determinanti meccanismi quali la risalita di fluidi aggressivi e i fenomeni di aumento e di diminuzione di pressione indotti dalle oscillazioni della tavola d'acqua al di sotto del piano campagna.

1.2. - LA CLASSIFICAZIONE DEI FENOMENI DI SPROFONDAMENTO IN BASE ALLA CASISTICA ITALIANA

La difficoltà di realizzare una classificazione soddisfacente dei fenomeni di *sprofondamento*, da un punto di vista genetico-evolutivo, risiede nel fatto che lo sviluppo di tali fenomeni è spesso legato alla coesistenza di più variabili, la cui trattazione non risulta sempre di facile analisi. Molteplici sono infatti i fattori che partecipano alla evoluzione di uno sprofondamento catastrofico, soprattutto se si tiene presente che le aree italiane in cui si verificano i fenomeni, sebbene geologicamente diverse, presentano un fattore unificante rappresentato dall'essere sempre aree di pianura e di risorgenza delle acque sotterranee che circolano in circuiti profondi all'interno del *bedrock*.

La più recente e completa classificazione proposta in ambito internazionale è quella di 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: *sinkhole da dissoluzione*, *sinkhole da crollo*, *sinkhole della copertura*, *sinkhole per caduta a goccia*, *sinkhole da suffosione*, *sinkhole sepolti*. Di tale classificazione se ne parlerà nel seguito del volume.

Una prima classificazione generale (fig. 1) delle varie tipologie di sprofondamenti vede la suddivisione in alcune grandi classi di fenomeni in relazione ai processi genetici che li hanno originati, e cioè

l'attività umana, le acque di infiltrazione, o i fluidi di risalita:

- sprofondamenti antropici (coincidenti con il termine di *anthropogenic sinkhole*),
- fenomeni carsici;
- fenomeni di evorsione o suffosione superficiale
- fenomeni di *piping* profondo.

Si definisce in generale *sprofondamento* una cavità di forma varia, anche se generalmente sub-circolare, formata rapidamente, tipica di zone carsiche, di aree di pianura, di aree urbane, di aree il cui sottosuolo presenti altre cavità anche di origine antropica. In base ai meccanismi genetici:

Sprofondamento di origine antropica - anthropogenic sinkhole: semplice collasso di volte originate dall'attività umana (cave, miniere, catacombe, scavi di varia origine etc.), con formazione di cavità con morfologia varia, non necessariamente sub-circolare.

Per quanto riguarda i fenomeni carsici sembra utile riportare la suddivisione genetica delle doline; la classificazione di questi fenomeni è stata realizzata in base al meccanismo che provoca la cavità in superficie. I meccanismi a cui sono riconducibili i fenomeni sono i seguenti:

- la sola dissoluzione o *solution*
- la lenta subsidenza o *subsidence*
- il crollo o *collapse*

Dolina di soluzione normale - solution sinkhole: conca chiusa (dallo slavo *dol* che significa valle) originata per dissoluzione della roccia da parte dell'acqua di ruscellamento superficiale (CRAMER, 1941; CASTIGLIONI, 1986). Questa tipologia carsica si verifica nei casi in cui il substrato carbonatico è affiorante o sub-affiorante, tipica nelle aree di altopiano o dorsale carbonatica. È possibile che sia presente un esiguo spessore del materiale di copertura o terre rosse che comunque consente l'attacco diretto da parte dell'acqua di ruscellamento. Quando il fenomeno risulta accelerato e concentrato si parla di *accelerated solution doline* (SAURO, 2003).

Dolina alluvionale-subsidence sinkhole - cover subsidence sinkhole: conca chiusa che si forma su materiali di copertura in genere, e/o alluvionali, in seguito all'originarsi, in rocce solubili sottostanti, di cavità carsiche per dissoluzione sub-superficiale o di crollo (CASTIGLIONI, 1986). Tale tipologia è caratteristica delle aree dove al di sopra di un *bedrock* carbonatico carsificato, sono presenti spessori di materiale non coesivo come ad esempio sabbie sciolte e ghiaie. I meccanismi di innescamento di questo tipo di morfologia sono dovuti a processi di natura gravitativa e di filtrazione (*raveling*) che subiscono i terreni sciolti nelle cavità carsiche del *bedrock*. I materiali incoerenti

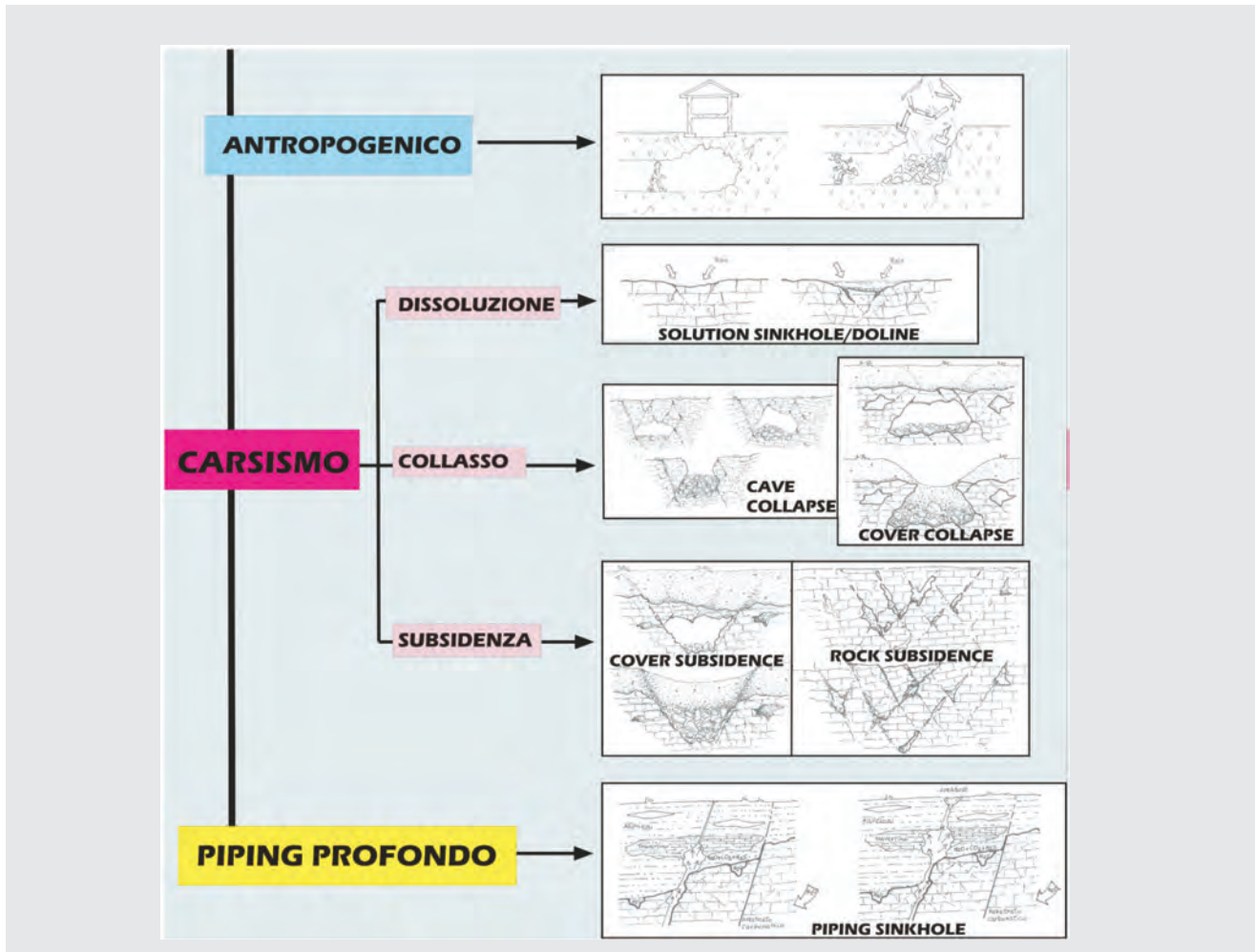


Fig. 1- Classificazione dei fenomeni di sprofondamento.
- Classification of sinkhole phenomena.

infatti, posti al di sopra delle cavità del substrato vengono drenati nelle cavità sottostanti mediante meccanismi di *raveling* (TIHANSKY, 1999). L'attivazione del fenomeno avviene in relazione alle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale di copertura, nonché nello spessore dello stesso (NEWTON, 1984, 1987). Il propagarsi del fenomeno agli strati superficiali della copertura determina il formarsi di un avvallamento della topografia. Il continuo progredire dei processi di dissoluzione del *bedrock* e di filtrazione nella copertura fanno sì che la cavità si approfondisca fino al cessare del fluire del materiale nella cavità carsica. L'evoluzione di questa tipologia avviene in maniera piuttosto graduale, anche se le dimensioni e le profondità possono arrivare ad alcune decine di metri.

Dolina di subsidenza in roccia - rock subsidence sinkhole: cavità formatesi su rocce coerenti e permeabili ma non solubili, poggiate su rocce

solubili per crollo di volta (CASTIGLIONI, 1986). La formazione della cavità avviene per movimenti successivi e assestamenti gradualmente dei litotipi con comportamento rigido, con formazione di un reticolo di fratture.

Dolina di crollo - cave collapse sinkhole: cavità con forma a pozzo nei calcari e in rocce solubili formatesi per il crollo del soffitto di grotte (CRAMER, 1941; CASTIGLIONI, 1986; FORD, 1989). Al tetto della cavità carsica è necessario che vi sia materiale litoide (tufi, calcari, travertini etc.). La cavità viene generata dal progressivo assottigliamento del materiale costituente la volta. L'attivarsi della dolina di crollo può generare spesso, sia per le dimensioni sia per la repentinità dei fenomeni, conseguenze catastrofiche. La forma della cavità originatasi secondo questo processo tende ad allargarsi verso il basso con pareti non perfettamente verticali ma inclinate secondo un profilo tronco-conico.

Dolina per crollo di copertura - cover collapse sinkhole: cavità con forma cilindrica o troncoconica sviluppata su coperture terrigene poste al di sopra di *bedrock* carbonatico formatesi per il crollo della volta (CRAMER, 1941; CASTIGLIONI, 1986; FORD, 1989). Al tetto della cavità carsica è necessario che vi sia materiale terrigeno permeabile o semipermeabile di spessore modesto. La cavità viene generata dal progressivo assottigliamento del materiale costituente la volta. I meccanismi che producono il crollo sono prevalentemente controllati dall'infiltrazione dall'alto (*raveling*) e da collassi che procedono dal basso verso l'alto (THARP, 1997 *cum biblio*). L'attivarsi della dolina di crollo può generare spesso, sia per le dimensioni sia per la repentinità dei fenomeni, conseguenze catastrofiche. Tale tipologia di *sinkhole* appare molto simile al *sinkhole* per *piping* profondo, le sole caratteristiche distintive sono lo spessore della copertura, che in questo caso è più esiguo (<30 m), mancanza di processi di liquefazione e mancanza di fluidi aggressivi in pressione.

Cavità di evorsione: sono relative a processi erosivi provocati da turbolenze ad asse verticale che si verificano generalmente in grandi pianure alluvionali (Pianura Padana) in seguito a rotte arginali, o in ambienti lagunari e deltizi in relazione ad intrusioni marine. Le forme risultanti (omologhe ai *sinkhole ponds*) da tali processi sono laghetti sub-circolari in aree di pianura (gorghi o laghetti di rotta), con diametri variabili da 100 a 30 m e profondità fino a un massimo di 13-15 m. Tali laghetti risultano collocati ove si può ritenere che si sia prodotta la confluenza di notevoli quantità d'acqua; sono ubicati ai piedi di un argine fluviale in corrispondenza di una rotta, o in un territorio depresso nel luogo di convogliamento di acque tracimate, oppure in punti in cui queste hanno dovuto attraversare strutture lineari come argini, dossi, cordoni litoranei. Queste cavità si formano su terreni in cui è presente una grande percentuale di sabbia. In tali condizioni possono giocare un ruolo determinante i processi di suffosione superficiale e il sifonamento; infatti in condizioni di elevata pressione idrostatica, in tali ambienti, è frequente la formazione di "fontanazzi", che non vanno confusi con i gorghi, ma possono costituirne il punto di innescamento (BONDESAN, 1995). Per tali motivi i gorghi presentano analogie con i *sinkhole ponds*, ma il processo genetico notevolmente differente procede nel caso dell'evorsione dall'alto anche se aiutato da processi erosivi superficiali dal basso.

Cavità di suffosione: si tratta di cavità di forma circolare che si realizzano in terreni sciolti (generalmente in coperture eluviali e colluviali) per fenomeni di erosione dal basso con formazione di condotti

verticali e sub-orizzontali che interessano soltanto i primi metri della copertura (CASTIGLIONI 1986).

Sinkhole per piping profondo - deep piping sinkhole: caratteristica distintiva è un meccanismo profondo di erosione dal basso che investe spessori notevoli di copertura. Questa classe è rappresentata da cavità colmate d'acqua, attraverso il processo di annegamento, che si aprono su coperture a granulometrie variabili ma prevalentemente fini (argille siltose o limi con spessori superiori ai cento metri) impermeabili o semipermeabili, in cui è improbabile una filtrazione verso il basso (NISIO, 2003; TUCCIMEI & SALVATI, 2003; NISIO & SALVATI, 2004). Ciò che distingue questi *sinkholes*, è il fatto che l'acqua di riempimento, mineralizzata e con risalita di gas, presenta una prevalenza tale da renderla a volte artesianiana al piano campagna o al di sopra di esso generando quindi delle sorgenti (da cui il nome anche di *spring sinkhole* usato da alcuni Autori; TUCCIMEI & SALVATI, 2003).

La coesistenza di acque mineralizzate e di emissioni gassose, sostanzialmente riconducibili a CO₂, H₂S, assente o limitata in tutti gli altri fenomeni censiti nelle diverse aree, induce ad invocare un modello genetico ed evolutivo che si discosta da quelli comunemente accettati.

Si può ipotizzare un ruolo attivo e di primo piano svolto dal "fattore A/G" (Artesianismo/Gas), sia nella genesi che nello sviluppo di questo tipo di fenomeni. In particolare si pensa che, al momento della formazione di questi fenomeni, la risalita di acque miscelate a gas di origine profonda possa aver meccanicamente contribuito in maniera determinante all'attivazione degli sprofondamenti (NISIO & SALVATI, 2004).

In altre parole, a differenza degli altri tipi di fenomeno, l'acqua presente all'interno di questi *sinkholes* sarebbe idraulicamente connessa alla circolazione idrica sotterranea attiva nel basamento carbonatico (TUCCIMEI *et alii*, 2002; NISIO, 2003; TUCCIMEI & SALVATI, 2003; NISIO & SALVATI, 2004; TUCCIMEI *et alii*, *in printing*); ovvero in questo tipo di *sinkhole* la quota di imposta della deformazione sarebbe proprio quella del tetto del *bedrock* carbonatico, indipendentemente dalla profondità a cui esso è posto. La falda in pressione, indotta dal differenziale idraulico rispetto alle zone di alimentazione poste nei massicci limitrofi, risalirebbe lungo discontinuità tettoniche (FACCENNA *et alii*, 1993), agevolata anche dalla presenza di convogli gassosi in risalita dal profondo.

La doppia azione aggressiva sia chimica, legata alla rinnovata aggressività delle acque conferitagli dal mixing con i fluidi gassosi acidi, sia meccanica, indotta dal moto turbolento che si innescherebbe nelle fratture in allargamento, nonché dal rimescolamento provocato dal materiale che pro-

gressivamente vi precipita, porterebbe ad una accelerazione dei fenomeni di propagazione della deformazione all'interno della copertura, rendendo così possibile il verificarsi di questi fenomeni anche laddove questa raggiunge spessori dell'ordine del centinaio di metri.

1.3. - I DEEP PIPING SINKHOLE: IL PROCESSO GENETICO

I *deep piping sinkhole* non vengono descritti nello specifico da WALTHAM & FOOKES (2005) nella classificazione precedentemente riportata e rappresentano un particolare tipo associabile ai *dropout sinkholes* (*sinkholes* per caduta a goccia), del tutto tipico di alcune aree di pianura italiane.

Il modello geologico concettuale affinché si verifichi un *sinkhole* di questo tipo prevede la presenza, al di sopra del *bedrock* carbonatico carsificato, di un potente pacco (50-200 m) di depositi di copertura. Le dimensioni granulometriche degli elementi della copertura possono essere variabili; generalmente si tratta di depositi alluvionali che presentano frequenti variazioni granulometriche in senso verticale e laterale, dalle argille-sabbiose, ai limi, alle sabbie, alle ghiaie. Associazioni sedimentarie di questo tipo determinano nell'intero pacco un certo grado di coesione e una portanza naturale.

Appare molto improbabile, per lo spessore notevole dei materiali di copertura (fino a 200 m), un risentimento in superficie di un processo di crollo a partire da una cavità profonda, mediante processi di *raveling* (scorrimento di materiale verso il basso), soprattutto per la presenza all'interno di tali sedimenti di depositi argillosi impermeabili o scarsamente permeabili in grado di assorbire le deformazioni che si sono generate in profondità.

Inoltre in gran parte dei casi di *sinkholes* studiati si osserva l'assenza almeno nei primi metri di copertura di movimenti rivolti verso il basso delle acque di circolazione idrica sotterranee, in grado di drenare il materiale di copertura. Il fenomeno è poi facilitato se all'interno del pacco di sedimenti sono presenti lenti di terreni carsificabili (quali travertini, o ghiaie di natura prevalentemente carbonatica).

Nelle sabbie la presenza di acqua determina un aumento delle forze di galleggiamento; nel caso di una formazione argillosa invece l'acqua agisce direttamente sullo stato di coesione del materiale generando in entrambi i casi un'azione di ritardo dei processi di *raveling* che potrebbero interessare questi terreni (WHITE 1995).

I processi di *deep piping* avvengono solitamente in materiali che presentano una classe granulometrica corrispondente alle sabbie o ai limi, le argille coesive non possono essere soggette a *piping* pro-

prio perché materiali dotati di coesione. Tuttavia in presenza di una coltre, costituita da alternanze di terreni a differente granulometria, non si può escludere che i processi di *piping* possano avvenire solamente in alcuni intervalli del pacco alluvionale. Sono stati studiati (BERTI *et alii* 2002; CAMPOBASSO *et alii*, 2004; CENSINI & COSTANTINI, 2002; DEL GRECO *et alii*, 2003, 2004), e verranno anche di seguito illustrati, casi in cui il modello di *deep piping sinkhole* si adatta a sprofondamenti che hanno interessato coperture costituite da orizzonti di argille marine plioceniche dotate di discreta coesione.

I modelli concettuali esistenti, per lo più derivati da esempi stranieri, per spiegare tali tipi di cavità mal si adattano alla complessità della situazione geologico strutturale ed idrogeologica delle condizioni al contorno di alcuni dei casi individuati in Italia.

Ciò che accade è la formazione di una cavità, all'interno del materiale di copertura che si propaga dall'interfaccia tra il *bedrock* e i depositi di copertura (o al contatto di litologie con differenti caratteristiche di resistenza) verso l'alto (WHITE *et alii*, 1995; THARP, 1999, 2000), e si innalza fino a quando la stessa non riesce più a sopportare gli sforzi di taglio, allora il materiale collassa dando luogo ad una voragine (fig. 2) che si forma nell'arco di 6-24 ore (ne sono esempi i casi avvenuti in epoca molto recente). La profondità in cui solitamente può avvenire il collasso finale può essere stimata pari a circa una trentina di metri (dato proveniente dalle indagini geofisiche svolte per alcuni dei fenomeni studiati); la cavità perciò risale verso l'alto fino a 30 m dal p.c. dopo di che si ha il collasso. Il meccanismo di formazione sarebbe dunque operato dalle acque, ricche di gas, in pressione e in risalita.

Si ritiene possibile che movimenti orientati verso l'alto, guidati da differenze di carico idraulico, possano provocare, in terreni non consolidati (MASSARI *et alii*, 2001) così come in terreni a maggiore resistenza ma facilmente erodibili (HILL, 1996) fenomeni di liquefazione e/o dissoluzione che progrediscono dal basso verso l'alto attraverso camini prodotti da fenomeni di condensazione che favoriscono la concentrazione della dissoluzione in particolari punti, spesso corrispondenti anche a linee di frattura ad andamento subverticale (definiti da alcuni autori *pipes*: HILL, 1996; MASSARI *et alii*, 2001).

I *pipes*, orientati lungo direttrici sub-verticali, mostrano al loro interno motivi deposizionali di tipo convesso rispetto alla direzione di propagazione delle acque di *upwelling*, proprio in virtù della rideposizione che subiscono i materiali interessati dalla liquefazione (MASSARI *et alii*, 2001). La risa-

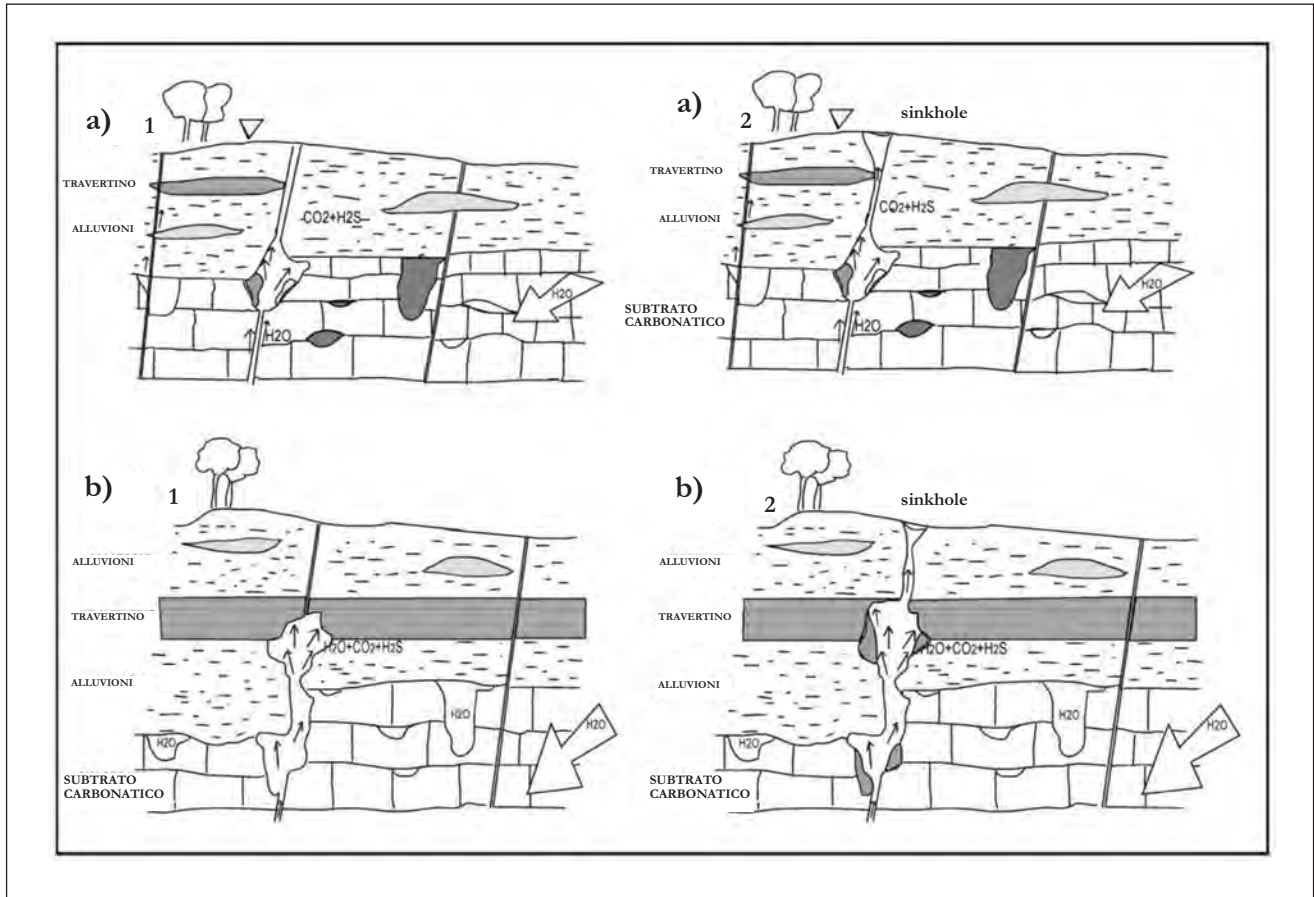


Fig. 2 - Schema dei meccanismi di risalita (da NISIO, 2003).
- Scheme of upwelling mechanism (from NISIO, 2003).

lita di acque profonde, in alcuni casi studiati, potrebbe essere controllata da discontinuità presenti nel *bedrock*, e talvolta anche nella stessa copertura, che andrebbero a rappresentare delle vere e proprie vie di fuga, oltre che per i gas, per le acque in pressione dell'acquifero profondo.

Le pareti delle cavità sono in genere perfettamente verticali con forma complessivamente cilindrica, il diametro e le profondità raggiungono poche decine di metri.

Spesso tali cavità vengono riempite d'acqua poiché si arriva all'intercettazione della falda; a volte al fondo sono sede di sorgenti spesso di acque mineralizzate, il che fa presupporre una risalita da falde profonde in pressione.

In alcuni casi assume importanza l'area di ricarica rappresentata da un acquifero che dà origine ad intensa circolazione sotterranea con formazione di sorgenti, talvolta anche minerali o termominerali, di elevata portata.

Una ulteriore origine dei fenomeni di liquefazione è rappresentata dalla propagazione di onde sismiche, provenienti anche da ipocentri di lontana origine, che determinano la rottura di un equilibrio meta-

stabile (FERRELI *et alii*, 2004; GRACIOTTI *et alii*, 2004).

In corrispondenza di un evento sismico, in un terreno granulare saturo, il passaggio di onde sismiche provoca infatti, unitamente al cambiamento dell'assetto dei granuli, un incremento della pressione di poro che, se raggiunge i valori della pressione litostatica determinata dal carico dei materiali soprastanti, porta alla liquefazione dei terreni. Nel caso, inoltre, in cui la falda non sia troppo profonda tale fenomeno può tradursi nella fuoriuscita violenta di sabbia mista ad acqua dal terreno.

1.4. - DEEP PIPING SINKHOLE: LA MORFOLOGIA

I fattori di innesco, la genesi e lo sviluppo dei *deep piping sinkhole* sono sostanzialmente diversi da quelli delle doline, in particolare in considerazione del fatto che sostanzialmente i primi sono fenomeni che si generano e si propagano dal basso verso l'alto (*hypogeous upward propagation*), mentre le seconde sono dovute a processi di infiltrazione delle acque superficiali (dall'alto al basso all'interno del terreno).

Ciononostante, le forme conclusive con cui i due tipi di fenomeni si presentano sono molto simili e rappresentano probabilmente l'elemento di maggior difficoltà per discriminare un processo dall'altro.

In generale questi sprofondamenti sono forme erosive sub-circolari a geometria cilindrica, formatesi rapidamente, con diametri estremamente variabili (fig. 3) (WHITE, 1988; CANUTI, 1982; GALLOWAY *et alii*, 1999; HYATT *et alii*, 2001) localizzati in aree di pianura, al di sopra di terreni di copertura di elevato spessore (CANUTI, 1982; SALVATI & SASOWSKY, 2002; NISIO, 2003). La forma e la geometria sub-cilindrica o tronco-conica dei *sinkholes* è stata rilevata da numerosi Autori nel corso di indagini batimetriche (OGDEN *et alii*, 1989; BONO, 1995), di indagini geofisiche (STEEPLES *et alii*, 1984; CHANG & BASNETT, 1995; KAUFMANN & QUINIE, 1999; ARGENTIERI *et alii*, 2001b; DI FILIPPO *et alii*, 2002) o di investigazioni sub-acquee (CARAMANNA, 2001; GARY *et alii*, 2003) ed è stata inoltre evidenziata da diversi lavori di modellizzazione analogica (WALEED & GOODINGS, 1996) o di simulazione numerica (WALEED, 1995; THARP, 1997; SALVATI *et alii*, 2001). Essa risponde strettamente alle modalità di sviluppo e di propagazione della deformazione che in termini semplificativi può essere assimilata allo sviluppo dei camini di collasso ben noti a chi si occupa di stabilità delle opere in sotterraneo.

Concettualmente, la forma e la geometria dei *sinkholes* deriva da un processo che prevede l'innescò di uno "svuotamento" dal basso di un piccolo settore della copertura talora a contatto con il *bedrock* (protocavità). Questo "svuotamento" si propaga quindi per "crolli successivi" attraverso l'intero spessore dei depositi di copertura assumendo, in funzione della combinazione di più

processi (*piping*, *raveling*, crolli successivi), della reologia e del comportamento meccanico dei materiali interessati, geometrie che possono essere imbutiformi o pseudo-cilindrici. Il collasso finale, nel momento in cui la propagazione della deformazione arriva in prossimità della superficie, avviene in unica soluzione e porta alla genesi delle forme cilindriche.

Nel caso in cui si verificano le condizioni per una reiterazione del fenomeno nello stesso punto (CAPELLI *et alii*, 2000), i *sinkholes* possono assumere forme meno definite e più articolate per la coalescenza dei diversi sprofondamenti.

1.5. - DEEP PIPING SINKHOLE: PROPAGAZIONE DEI FENOMENI

I fattori di sviluppo sono quegli elementi che agevolano, favoriscono o comunque caratterizzano la propagazione della deformazione dal punto di innesco verso la superficie.

Tra questi un ruolo di primo piano è svolto dalle caratteristiche reologiche e dalle proprietà geomecniche dei terreni che costituiscono la copertura. Come esposto da THARP (1997, 1999, 2000) il fenomeno dell'*upward propagation* può essere descritto con un modello di deformazione poroelastica dei terreni sottoposti a stress (SALVATI *et alii*, 2001; GARBIN *et alii*, 2004). Le cause che possono indurre stress e quindi innescare, nelle condizioni favorevoli, lo sviluppo di un *sinkhole*, sono molteplici tra cui occorre ricordare:

- la decompressione repentina dell'acquifero confinato;
- la "rottura" dell'interfaccia *bedrock*/copertura



Fig. 3 - Esempi delle variabilità del diametro delle cavità: a) *Sinkhole* del Bottegone (GR); b) *Sinkhole* del Centro Agricolo Piana di S. Vittorino (RI).
- Example of diameter of the caves: a) Bottegone sinkhole (GR); b) S. Vittorino plain sinkhole (Centro Agricolo).

con conseguente innesco di un fenomeno di *raveling* e quindi la creazione di microcavità;

- l'effetto di "pumping" dinamico che la falda in pressione esercita sui terreni di copertura;

- la suffosione profonda o *deep piping* che le acque di circolazione carsica potenti, aggressive e veloci esercitano sui depositi a scarsa coesione.

Anche la propagazione della deformazione verso l'alto è direttamente dipendente dalle caratteristiche geotecniche dei terreni interessati.

Mentre, infatti, è intuitivo che una copertura composta di materiali privi di coesione si comporterà come la sabbia in una clessidra, fluendo senza soluzione di continuità verso il basso e propagandosi in progressione geometrica con una forma conica, la presenza di orizzonti o spessori di materiali coesivi o addirittura litoidi o pseudolitoidi, presenti pressoché ovunque nelle stratigrafie delle pianure italiane, imporrà alla propagazione della deformazione un avanzamento per fasi discrete. Queste, inoltre, produrranno delle geometrie non necessariamente coniche o pseudo-coniche, bensì cilindriche, in virtù delle proprietà dei materiali più competenti.

Altri importanti elementi di sviluppo sono: i già citati *pumping* e *deep piping* che la falda in pressione esercita sui terreni della copertura una volta che si siano create le condizioni per un "de-confinamento" locale. È possibile ipotizzare, nel momento in cui, rotta l'interfaccia di confinamento tra acquifero e copertura, la falda in pressione è libera di spingere sui terreni sovrastanti, che si possono innescare fenomeni di erosione meccanica diretta dei terreni di copertura stessi e soprattutto, se le condizioni di circolazione carsica lo permettono, di dissoluzione chimica, di trasporto solido ed allontanamento del materiale eroso da parte della circolazione idrica sotterranea.

A questo occorre poi aggiungere il non trascurabile effetto indotto dai fluidi gassosi (in genere CO_2 e H_2S) risalenti dal profondo e delle mutate condizioni idrogeochimiche prodotte dal miscelamento con fluidi mineralizzati. Questi due fattori giocano un ruolo di alterazione chimica dei terreni di copertura con conseguente erosione chimica o degradazione delle caratteristiche geomeccaniche dei terreni. I convogli gassosi inoltre possono esercitare un effetto di sottospinta che si aggiunge a quello esercitato dalla falda in pressione. Fattore ricorrente nelle aree suscettibili ai fenomeni studiate è la presenza di discontinuità tettoniche o strutturali nel substrato, che in alcuni casi possono essere anche lineamenti tettonici attivi; questi interessano gli stessi terreni di copertura, i quali rappresentano generalmente le vie preferenziali di sviluppo dei processi sopradetti e conseguentemente

le zone in cui preferenzialmente si sviluppano i *sinkholes* (BROOK & ANDERSON, 1985; VENI, 1987; FACCENNA *et alii*, 1993; CAPELLI *et alii*, 2000; KAUFMANN & QUINIF, 1999; SALVATI *et alii*, 2001; SALVATI & SASOWSKY, 2002; NISIO, 2003; NISIO *et alii*, 2007; CARAMANNA *et alii*, 2008).

1.6. - LE CAUSE PREDISPONENTI ED INNECANTI

I *sinkholes* si originano in contesti di complesse situazioni geologico-strutturali ed idrogeologiche del territorio e vengono innescati per motivi di diversa natura quali un sisma, un periodo di siccità seguito da un periodo di ricarica e di risalita della falda che può provocare una variazione rapida del livello piezometrico, l'emungimento di grandi quantitativi di acqua dal sottosuolo.

Definire una causa principale è difficile poiché le cause identificate sono molteplici e generalmente concomitanti; esse possono essere distinte in predisponenti ed innescanti il processo, e così riassunte:

Cause predisponenti

1) La presenza di un pacco di sedimenti impermeabili o semi-permeabili al tetto del substrato, costituito da limi, argille, sabbie a differente granulometria, omogenee o eterogenee.

2) Scadenti caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali di copertura.

3) Presenza di un reticolo di fratture o faglie che permettano una maggiore circolazione idrica con scambi tra terreni di copertura e substrato facilitando l'erosione meccanica dei terreni sciolti.

4) Presenza di acque di circolazione sotterranea; una falda con oscillazione del livello piezometrico.

5) In alcuni casi è presente un substrato carbonatico o costituito da roccia solubile sottoposto a fenomeni carsici; la presenza di una morfologia articolata del substrato, con macroforme carsiche (doline, uvala, crepacci e grotte) e con cavità carsiche presenti al tetto del substrato (interfaccia copertura/roccia).

6) Presenza di gas nel sottosuolo, generalmente CO_2 e H_2S che consentano, in alcuni casi, la dissoluzione dei materiali di copertura e la risalita delle acque.

Cause innescanti

Tra i principali eventi che possono indurre la formazione di *sinkholes* si ricordano:

1) Alternanza di periodi secchi e piovosi con conseguenti rilevanti oscillazioni della falda.

2) Scosse sismiche.

3) Attività antropiche: estrattive, emungimenti di acqua.

Tali eventi determinano la formazione del *sinkhole* in seguito ai seguenti possibili meccanismi:

1) Decompressione repentina dell'acquifero in pressione.

2) "Rottura" dell'interfaccia *bedrock*/copertura con conseguente innesco di un fenomeno di *raveling* e quindi la creazione di microcavità.

3) L'effetto di "pumping" dinamico che la falda in pressione esercita sui terreni di copertura.

4) La suffosione o *piping* che le acque di circolazione potenti e veloci esercitano sui depositi a scarsa coesione.

1.7. - IL TRASPORTO DEI MATERIALI

Un problema ancora dibattuto in letteratura è il movimento, il trasporto e lo smaltimento del materiale che collassa verso il basso. La comprensione del fenomeno è difficile in quanto esso è solo in casi eccezionali sottoposto ad osservazione diretta.

Il terreno collassato potrebbe essere compattato o trasportato in profondità o per processi gravitativi di *raveling* e andare a colmare cavità carsiche presenti nel substrato, o è anche possibile che possa subire un trasporto orizzontale attraverso condotti carsici orizzontali. In quest'ultimo caso è necessaria la presenza di un vero e proprio circuito di drenaggio del materiale, ovvero di un reticolo carsico sotterraneo ben sviluppato e/o di paleoreticoli carsici. Tuttora si permane nel campo delle sole ipotesi.

Il *trasporto verticale* del materiale, dalla superficie verso il fondo, risulta strettamente connesso alla propagazione verso l'alto delle cavità all'interno dei terreni di copertura.

Il fattore che influenza in maniera determinante i movimenti verticali dall'alto verso il basso, che avvengono lungo le fratture nella copertura alluvionale al tetto del substrato, è dato dalla posizione della superficie piezometrica e dalle sue oscillazioni (THARP 1999; WHITE *et alii*, 1995).

Quando la falda si trova al di sopra del tetto dell'interfaccia substrato/copertura l'azione composta delle forze di galleggiamento e della pressione idrostatica di controspinta, che agisce sui materiali posti al di sopra della cavità, unitamente al lento fluire del materiale nei condotti carsici, genera un ritardo dei processi di caduta del materiale di copertura (WHITE *et alii*, 1995) determinando una lenta evoluzione del *sinkhole*.

È stata osservata, a questo proposito, una diretta connessione fra i fenomeni di sprofondamento e le oscillazioni della superficie piezometrica (TIHANSKY, 1999) in aree interessate da intensi emungimenti delle falde più o meno profonde o

in occasione di periodi di intensa siccità alternati a periodi di alluvionamento.

THARP (1995, 1997, 1999, 2000), mediante un approccio analitico del fenomeno (*poroelastic analysis*), asserisce che, nelle condizioni in cui si verifici un abbassamento della superficie piezometrica al di sotto dell'interfaccia substrato/copertura, i terreni soprastanti il substrato, posti ai margini di un'ipotetica cavità iniziale, subirebbero una sorta di rottura idraulica a causa della perdita delle forze di galleggiamento e dell'aumento del gradiente della pressione di poro, generando così una propagazione verso l'alto del vuoto iniziale, internamente ai terreni di copertura stessi. Inoltre l'Autore suggerisce che, ammettendo un vuoto iniziale in seno ai terreni di copertura di forma sferica, i processi di rottura idraulica possano agire con un'intensità direttamente proporzionale al raggio della cavità stessa.

Il *trasporto orizzontale* invece può avere luogo nel momento in cui, alla base dei condotti carsici sub-verticali, attraverso i quali avvengono i primi processi di caduta del materiale di copertura, si verificano le condizioni di presa in carico e di rimozione del tale materiale. Affinché si abbiano queste condizioni bisogna ipotizzare quindi delle vere e proprie modalità di trasporto solido che si localizzi alla base dei condotti sub-verticali e che, instaurandosi all'interno di cavità carsiche attive, si evolva, rispetto a questi, lungo delle direttrici orientate tangenzialmente.

Per cavità carsiche attive ci si riferisce a quelle cavità carsiche in grado di ospitare dei veri e propri "corsi d'acqua sotterranei" all'interno dei quali avvengono processi di trasporto del materiale del tutto simili a quelli che avvengono in corsi d'acqua subaerei (WHITE *et alii*, 1995).

In questo caso i materiali delle dimensioni della sabbia fine sono i più trasportabili, mentre quelli di dimensioni minori, essendo soggetti a coesione e/o flocculazione tendono ad agglomerarsi e a depositarsi, necessitando così di una maggiore energia da parte del corso d'acqua per essere rimossi dal fondo. Tuttavia le fasi di maggiore interesse per lo sviluppo di *sinkholes* sono quelle legate a l'elevata energia dei corsi d'acqua sotterranei, vale a dire durante le piene e le fasi alluvionali che risultano in grado di erodere e trasportare materiali anche grossolani.

In aree pianeggianti sede di recapito delle acque sotterranee, all'interno di un acquifero in pressione, impostatosi in corrispondenza di corpi carbonatici, per esempio, o in litologie che presentino cavità in comunicazione, intercalati ai depositi di copertura, le velocità di deflusso delle acque in cavità attive, potendo raggiungere anche

velocità di m/s potrebbero spiegare un continuo trasporto del materiale sia sabbioso che argilloso attraverso le discontinuità.

In queste condizioni, inoltre, nell'ipotesi in cui il condotto esistente presentasse delle irregolarità, le variazioni del regime di flusso, traducendosi in fenomeni di turbolenza potrebbero, interagendo con i materiali posti al di sopra dell'interfaccia copertura-substrato, accelerarne i processi di *raveling*.

Bisogna, però, sottolineare che non essendo possibile esplorare i condotti in parola, le considerazioni qui espresse e quant'altro fosse ipotizzabile in merito alla dinamica del trasporto solido in condotti carsici sotterranei deve, necessariamente, essere affrontato con cautela e con le necessarie limitazioni speculative.

Tuttavia è possibile ritenere che, nel caso in cui si instaurino le condizioni per i processi di trasporto prima verticali e poi orizzontali, la capacità di rimozione del materiale all'interno di cavità attive risulti essere una delle fasi sicuramente non trascurabili nel corso dell'evoluzione di un *sinkhole* (WHITE *et alii*, 1995).

1.8. - L'EVOLUZIONE DEI SINKHOLES

1.8.1. - L'annegamento

Uno dei processi più frequenti ed evidenti dopo la formazione di un *sinkhole* è "l'annegamento" (*drowning*), determinato dall'acqua presente nei terreni di copertura. Non è infrequente infatti che, al verificarsi di uno sprofondamento catastrofico, in un'area dove il tetto della falda dell'acquifero più superficiale è prossima alla superficie topografica, l'acqua di falda si riversi all'interno della depressione dando a questa la fisionomia di un piccolo lago (fig. 4).

Quando la profondità della voragine è pari o superiore alla quota piezometrica della falda, il lago viene alimentato da quest'ultima. In tale situazione il livello dell'acqua all'interno del piccolo lago subisce delle fluttuazioni stagionali, poiché strettamente collegato al livello piezometrico della falda, con minimi nella stagione estiva. In alcuni casi, durante la stagione secca, o periodi di magra si assiste al prosciugamento del lago.

In altri casi si osserva, invece, che il piccolo lago ormai formato non subisce nessuna variazione stagionale di livello; inoltre è possibile osservare sulla superficie del lago bolle dovute a risalite di gas. In questi casi si può accertare la presenza di piccole emergenze al fondo lago; quando la portata delle sorgenti al fondo è notevole, è possibile che si formi un piccolo emissario. In questo secondo caso è evidente l'esistenza di un acquife-

ro in pressione, che ha esercitato un ruolo determinante nella formazione di una cavità sotterranea e nella evoluzione dello sprofondamento in superficie.

Il fenomeno di annegamento potrebbe essere influenzato dalla presenza di acquiferi in pressione all'interno del substrato, ed i fenomeni di risalita di fluidi profondi (acqua e gas), nei sedimenti di copertura possono operare in maniera diretta sull'evoluzione di sprofondamenti catastrofici in superficie.

La risalita delle acque profonde, in alcuni casi studiati (aree di S. Vittorino, (RI), Sezze (LT) etc. descritti nei capitoli successivi), potrebbe essere controllata da discontinuità (faglie, fratture) presenti sia nel substrato che nella copertura sedimentaria; quest'ultima può raggiungere spessori anche notevoli (100-200 m). In questi casi il *sinkhole* potrebbe essere in collegamento con l'acquifero basale attraverso un condotto che ha le stesse caratteristiche di un pozzo artesiano.

In alcuni casi tale processo è stato suffragato da analisi geochimiche delle acque e dei gas disciolti che ne hanno confermato l'origine profonda (CIOTOLI *et alii*, 1998, 2000).

I fenomeni di annegamento a cui si è assistito in epoca recente sono pochi, i più esemplificativi si riscontrano in Toscana: il *sinkhole* del Bottegone (BERTI *et alii*, 2002a, 2002b) e quello di Camaione (BUCHIGNANI, 2002; BUCHIGNANI & CHINES, 2002; D'AMATO AVANZI *et alii*, 2002); quest'ultimo è stato ricolmato artificialmente in tempi molto rapidi.

1.8.2. - L'estinzione

Il secondo fenomeno a cui può essere sottoposto un *sinkhole* dopo un certo numero di anni dalla sua formazione è l'estinzione: la voragine può, infatti, con il passare del tempo, prosciugarsi e ricolmarsi fino ad estinguersi (fig. 4).

Sono molti i casi di colmamento naturale di *sinkholes* in Italia (NISIO 2003; NISIO *et alii*, 2004; CAMPOBASSO *et alii*, 2004): si possono segnalare voragini ricolmate nella Piana di S. Vittorino, alcuni fenomeni nell'area del Fosso di S. Martino, Capena (Roma), dove erano presenti sei voragini ospitanti laghetti, di cui solamente una, il Lago Puzzo, è attiva ancora oggi, ma sembra anche essa ormai in via di estinzione.

Le cause dell'estinzione dei *sinkholes* sono tutt'ora da chiarire ma si possono fare alcune ipotesi.

Una prima causa è un eventuale apporto detritico da vicini torrenti o alvei o da materiale detritico e colluviale di vicini versanti.

Il franamento delle sponde della cavità può

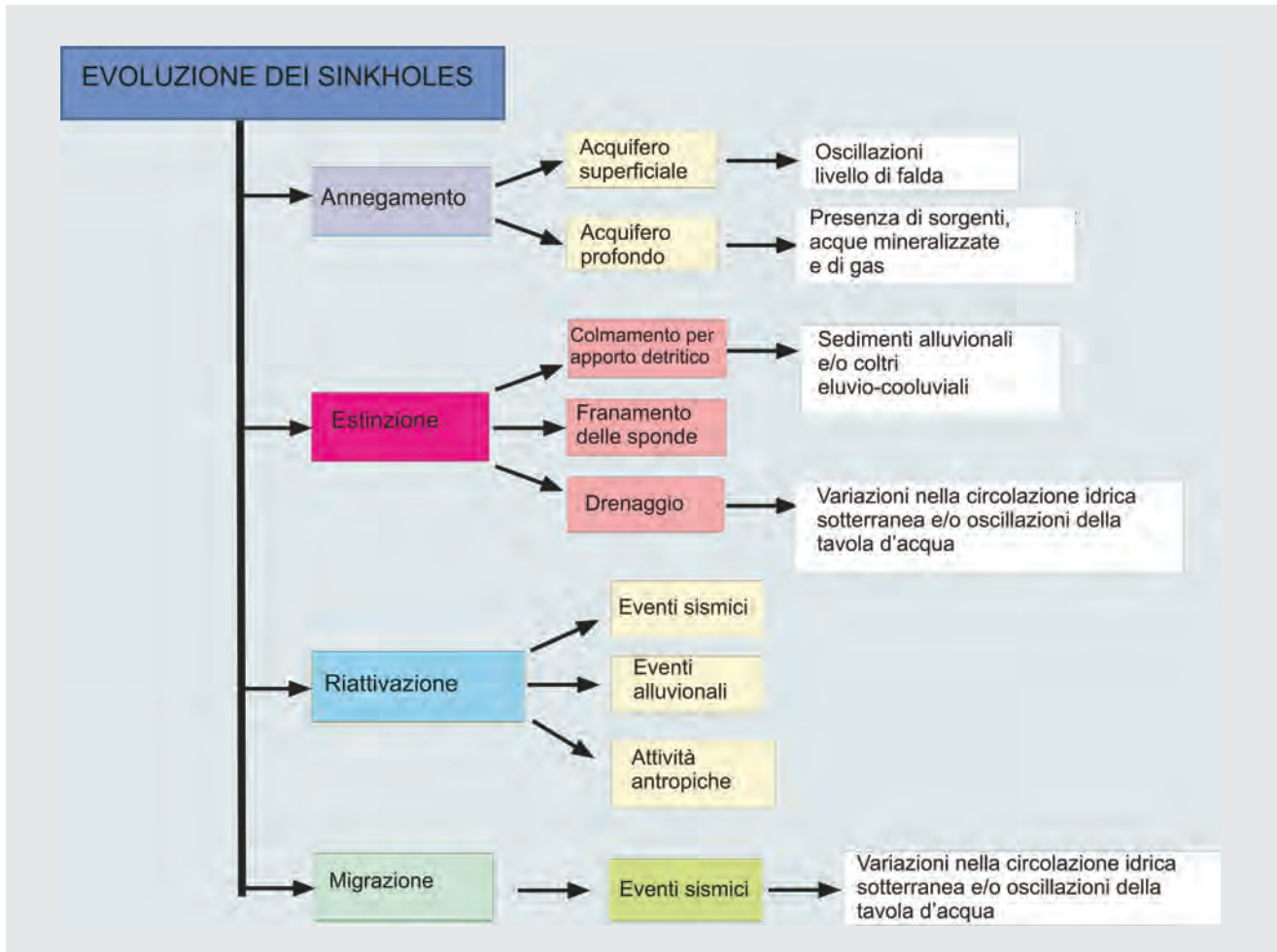


Fig. 4 - Schema dell'evoluzione dei fenomeni di *sinkholes*
- Evolution *sinkholes* scheme.

determinare il progressivo aumento del diametro della stessa e la diminuzione della profondità fino al livellamento progressivo delle pendenze.

Ulteriore possibilità è che non sussistano più con il tempo le condizioni per le quali il *sinkhole* si è generato, e che quindi venga a mancare l'apporto di acque sorgive al fondo e di fluidi gassosi (a causa della migrazione di sorgenti o per la variazione della circolazione idrica sotterranea o del livello piezometrico). Il *sinkhole* tenderebbe quindi a prosciugarsi fino ad estinguersi. Tali condizioni possono variare anche in un evento unico come per esempio un sisma. I terremoti possono pertanto essere sia la causa di innesco che della scomparsa di un fenomeno di *sinkhole*.

È evidente che differenti condizioni possano sussistere nello stesso luogo e sovrapporsi.

L'attività antropica è ovviamente un'ulteriore causa: è pratica comune nei campi l'interrimento delle voragini per non provocare il deprezzamento del terreno o per poter edificare.

1.8.3. - La riattivazione

I *sinkholes* estinti possono riaprirsi nella medesima posizione, oppure essere sottoposti ad altri episodi di crollo repentino che portano alla variazione della morfometria (aumento di diametro e/o aumento della profondità).

La spiegazione al fenomeno di riattivazione è il probabile ripristino, dopo una fase di stasi, delle condizioni che hanno portato alla sua formazione (eventi sismici, attività antropiche, eventi alluvionali etc).

1.8.4. - La migrazione

In alcuni casi la riattivazione dei fenomeni non avviene nella medesima posizione dell'originario sprofondamento ma ad una certa distanza: in tal caso si parla di migrazione del *sinkhole*.

Comprendere se c'è una direzione preferenziale della migrazione è ancora oggetto di studio, così

come per le cause della migrazione dei fenomeni.

La migrazione dei *sinkholes* tuttavia potrebbe essere spiegata con una variazione dei percorsi di risalita dei fluidi in seguito ad eventi sismici e alla conseguente attività delle principali faglie.

Altrimenti potrebbe trattarsi di semplici ripetizioni a distanza di fenomeni analoghi legati per lo più semplicemente alla risalita della falda in pressione.