

## Conclusioni

### Conclusions

NISIO S. (\*)

Nelle pianure italiane sono frequenti i fenomeni di sprofondamento naturale non strettamente correlati a carsismo, poiché si originano al di sopra di una potente copertura di terreni sedimentari semi-permeabili al tetto del *bedrock*.

Gli spessori dei sedimenti di copertura, per lo più costituiti da alluvioni miste con alternanze di intervalli a differente granulometria, sono generalmente prossimi ai cento metri, a volte superano ampiamente tali valori (fig. 1).

Queste voragini possono essere connesse a processi di liquefazione (*piping*), a soffusione profonda, ad oscillazioni della tavola d'acqua, dovute a diverse cause (*deep piping sinkhole* o *sinkhole s.s.*).

Tali fenomeni, da quanto emerso in questi studi, più diffusi di quanto in precedenza si pensasse, si verificano sul nostro territorio da tempi storici, quando i meccanismi genetici di innesco e propaga-

zione erano ancora sconosciuti. Le fonti storiche confermano che gli sprofondamenti catastrofici erano già noti in epoca romana, e con frequenza centennale hanno interessato, in alcune regioni, le medesime aree, laddove i primi fenomeni erano stati obliterati artificialmente o naturalmente (fig. 2).

Sono stati censiti e studiati nell'ambito del Progetto *Sinkhole* (APAT-ISPRA) circa 850 casi di sprofondamento naturale in aree di pianura, attribuiti a fenomeni di *sinkholes* naturale, ed effettuati sopralluoghi ed analisi di dettaglio in sito sui primi 350 casi (figg. 3, 4).

I fenomeni censiti si concentrano su conche intramontane, in valli alluvionali e in pianure costiere; subordinatamente alcuni fenomeni sono stati rinvenuti su fasce pedemontane di raccordo con aree di pianura ed in piccole depressioni intracollinari (fig. 5).

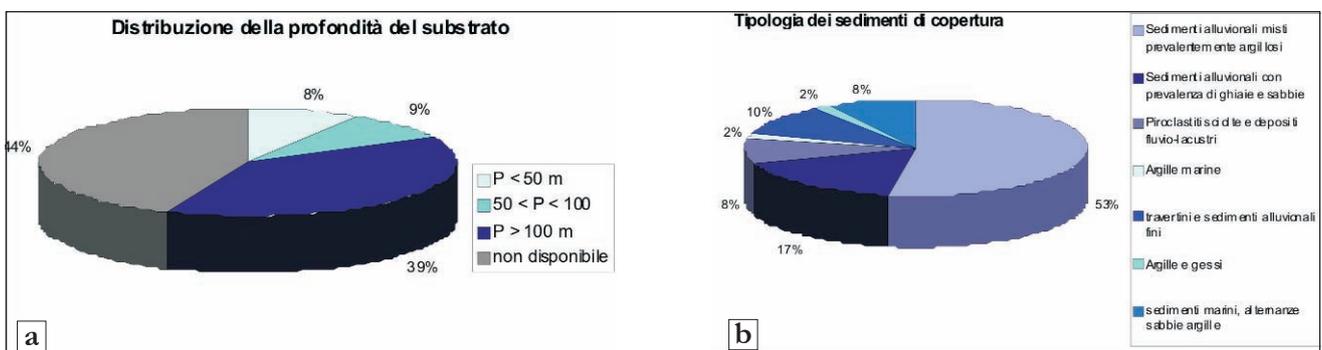


Fig. 1 - a) Profondità del substrato nelle aree suscettibili ai fenomeni di *sinkhole*; b) la tipologia dei sedimenti di copertura nelle aree suscettibili ai fenomeni di *sinkhole*.

- a) *bedrock deep in the sinkhole prone areas*; b) *cover sediments typology in the sinkhole prone areas*.

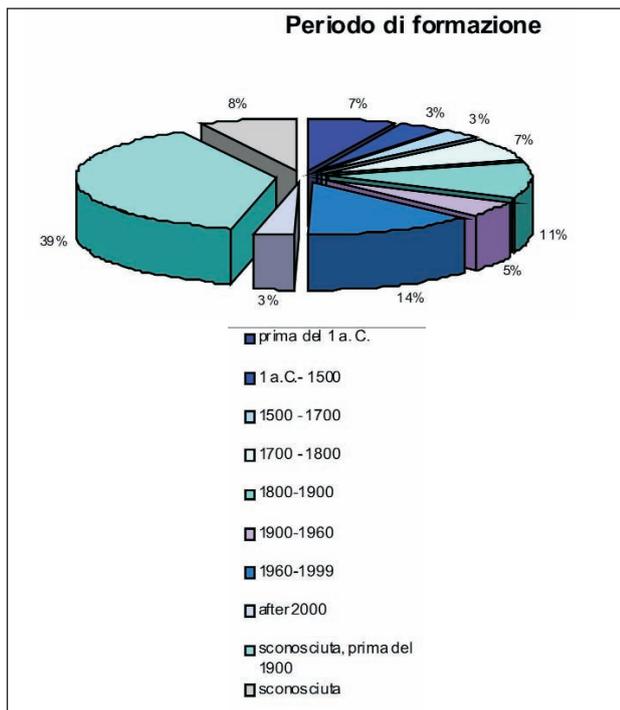


Fig. 2 - Distribuzione percentuale dei periodi di formazione dei *sinkholes* censiti.  
- Formation periods distribution of the censused *sinkholes*.

Per molti fenomeni censiti è stata ipotizzata una stretta connessione con meccanismi di risalita di fluidi mineralizzati.

Va tuttavia ribadito che non tutti i casi indagati sono risultati, a sopralluoghi effettuati, *sinkhole* s.s.; una parte dei fenomeni censiti sono stati classificati sprofondamenti antropici, fenomeni vulcanici, di evorsione e suffosione per rotta arginale o di dissoluzione carsica.

I fenomeni analizzati sono stati poi raggruppati in aree suscettibili distribuite su tutto il territorio (figg. 3, 6, 7).

Le aree suscettibili (fig. 3 b) si concentrano sul medio versante tirrenico ed in particolare nelle regioni del Lazio, Abruzzo, Campania e Toscana. Il versante adriatico, a causa del proprio assetto geologico-strutturale, non è interessato da questo tipo di *sinkholes*, così come l'arco Alpino e le Dolomiti.

In Italia settentrionale (territorio ancora non interessato dai sopralluoghi e dove è in corso il censimento) le condizioni sono differenti. Nelle pianure del Veneto ed in Emilia-Romagna, soprattutto in Pianura Padana alla confluenza del Po con l'Adige, sono presenti molti piccoli laghi di forma sub-circolare la cui formazione è imputabile a processi di evorsione (fenomeni erosivi legati a turbolenze ad asse verticale) a carico di corpi sedimentari caratterizzati da discreti spessori di materiali sabbiosi e/o a processi di liquefazione e suffosione.

In Emilia Romagna sono inoltre diffuse voragini di piccolo diametro e modesta profondità i cui meccanismi genetici di innesco sono ancora in fase di studio. Nelle pianure e conche interne del Veneto, del Friuli, della Provincia Autonoma di Bolzano i fenomeni di sprofondamento sono strettamente controllati dalla dissoluzione di litotipi evaporitici e carbonatici che si rinvencono al di sotto di una copertura generalmente di modesto spessore, riconducibili pertanto a tipologie di *cover-collapse sinkhole*.

I fenomeni segnalati in Calabria, invece, sono riconducibili a depressioni, di diametro estremamente variabile, oggi ricolmate e pertanto di difficile ubicazione, originatesi, nella totalità dei casi, durante eventi sismici e connesse a fenomeni di liquefazione dei terreni.

Il contesto geologico appare sostanzialmente differente in Sicilia e in Puglia in cui i casi di sprofondamento sono condizionati dalla presenza di terreni evaporitici (gesso e sale) o calcarei e da coperture argillose o sabbiose di spessore più modesto.

I risultati finora raggiunti, sui fenomeni censiti nelle aree di pianura, hanno permesso di individuare con maggiore precisione il contesto geologico-strutturale ed idrogeologico delle aree suscettibili ai *sinkholes* in Italia.

La maggior parte dei casi esaminati presenta le seguenti caratteristiche comuni:

- presenza di un potente acquifero confinato (falda in pressione) e di sorgenti poste nelle immediate vicinanze, con portate elevate ed acque mineralizzate.

- presenza al tetto del substrato di un potente pacco di depositi continentali, generalmente impermeabili o semipermeabili; le litologie dei sedimenti di copertura, nella maggior parte dei casi, sono compatibili con depositi continentali con granulometrie miste e intercalazioni di lenti di travertino, in altri casi sono presenti piroclastiti sciolte o terreni marini a bassa permeabilità.

- Scadenti caratteristiche fisico-meccaniche dei sedimenti di tetto.

- la presenza di un substrato carbonatico posto anche a notevole profondità (oltre i 100 m) si riscontra in molti dei casi esaminati, tuttavia, soprattutto nelle aree di origine vulcanica, esso non si dimostra condizionante per la notevole profondità a cui è ubicato.

- condizionamento strutturale delle piane nelle quali si originano i fenomeni.

- presenza di dislocazioni tettoniche e/o fratture che attraversano il substrato.

- presenza di un reticolo di piccole fratture o diaclasi che metta in comunicazione il mezzo permeabile con quello impermeabile.

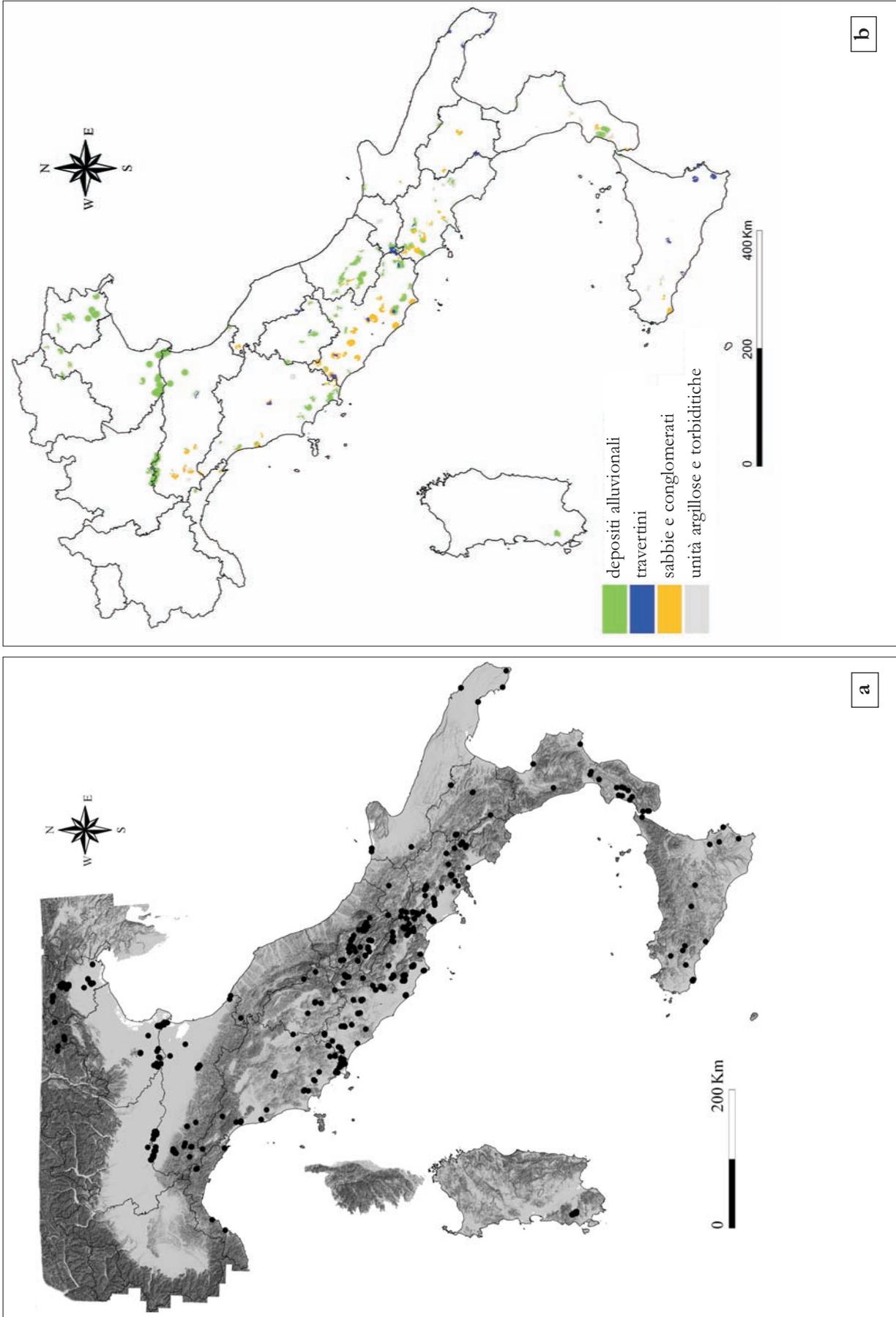


Fig. 3 - a) Distribuzione dei sinkholes censiti nell'ambito del Progetto Sinkhole (APAT-ISPR); b) Distribuzione delle aree suscettibili ai fenomeni di sprofondamento e composizione litologica dei sedimenti di copertura.  
 a) Sinkhole distribution, they are censied in the Sinkhole Project (APAT-ISPR); b) Sinkhole prone area distribution and lithologic composition of the cover sediments.

### Tipologia di dati raccolti

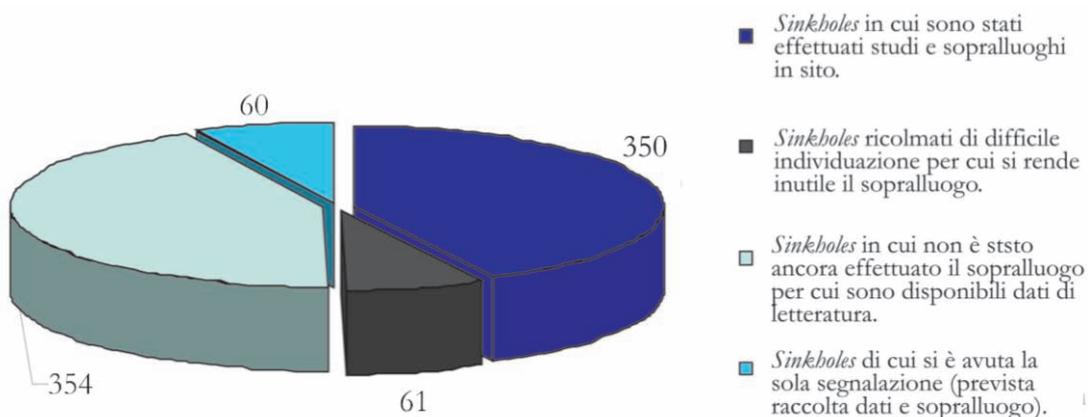


Fig. 4 - Tipologia dei dati raccolti sugli sprofondamenti.  
- Sinkhole data typology.

### Tipologia dell'area

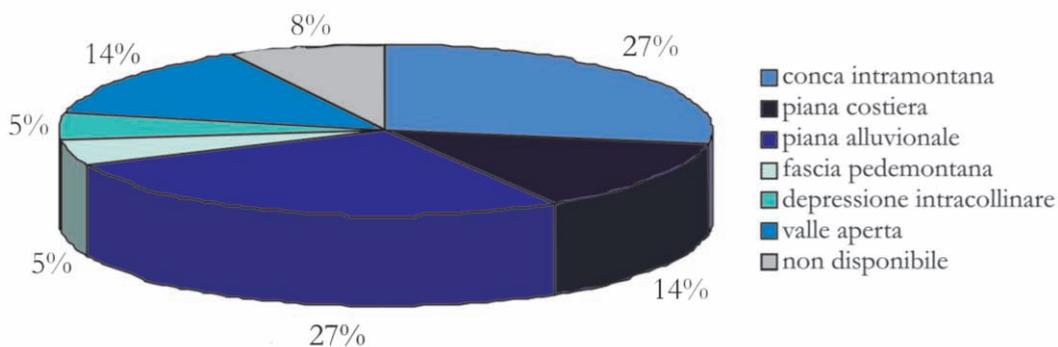


Fig. 5 - Scenario morfologico delle aree suscettibili ai fenomeni di sprofondamento.  
- Morphology scenario of the sinkholes prone area.

- presenza di anomalie di gas del suolo (radon, metano, elio, anidride carbonica, acido solfidrico).

Inoltre sono state individuate alcune cause innescanti, quali sismi, eventi alluvionali, attività antropiche che determinano la apertura della cavità in superficie (fig. 8). Le verifiche sinora effettuate hanno permesso di evidenziare per una buona percentuale dei casi analizzati (16%, 136 casi) una corrispondenza tra la data di formazione dello sprofondamento ed un evento sismico avvenuto qualche giorno prima. Nella gran parte dei casi lo sprofondamento si è verificato nell'arco delle 24 ore dal terremoto ma si sono registrate risposte al terreno

anche alcuni giorni dopo il sisma sino a 30 giorni. Le distanze dal sito all'epicentro possono essere di alcune decine di km per i terremoti ad elevata magnitudo. È possibile inoltre che terremoti strumentali siano responsabili, nell'area epicentrale, dell'apertura di sinkholes (fig. 9).

Si dispone, invece, di pochi dati per verificare la connessione dei casi di sprofondamento con eventi alluvionali eccezionali.

Caratteristica ricorrente in molte delle aree suscettibili è la presenza di faglie attive. Lungo esse, infatti, è stato possibile riconoscere allineamenti di sinkholes e di aree suscettibili. Alcuni di

tali lineamenti tettonici, che si estendono per decine di chilometri, hanno importanza regionale: la Linea Ortona-Roccamonfina, i sistemi di faglie che bordano la valle dell'Aterno, la faglia bordiera dei Lepini, la linea Fiamignano-Micciani ed il suo prolungamento fino alla piana del Fucino, la linea Ancona-Anzio (fig. 11).

Le misure effettuate in campagna ed i dati raccolti in letteratura hanno messo in evidenza un ampio range di valori delle dimensioni dei diametri

delle cavità (da pochi metri a più di 200 m) e delle profondità (da qualche metro a 50 m), anche se i valori più frequenti sono relativi a cavità con diametro compreso tra 50 e 100 m con scarsa profondità (fig. 12) e generalmente colmate da acque. Il rapporto morfologico (diametro/profondità) nella maggior parte dei casi è compreso tra 3 e 5. Gli eventi sono generalmente di tipo singolo anche se si riscontrano, forme gemellate o multiple, con stadio evolutivo maturo ed evoluzione costante.

### Distribuzione dei sinkholes nelle regioni italiane

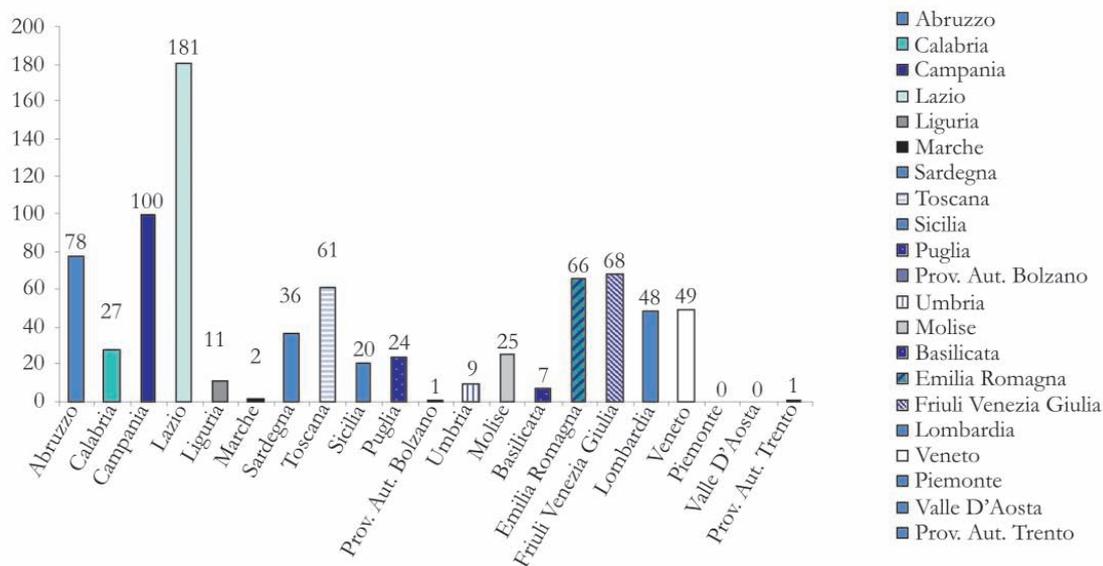


Fig. 6 - Numero dei casi censiti nelle diverse regioni italiane.  
 - Number of the censied sinkholes in the Italian districts.

### Numero di sinkholes per area suscettibile

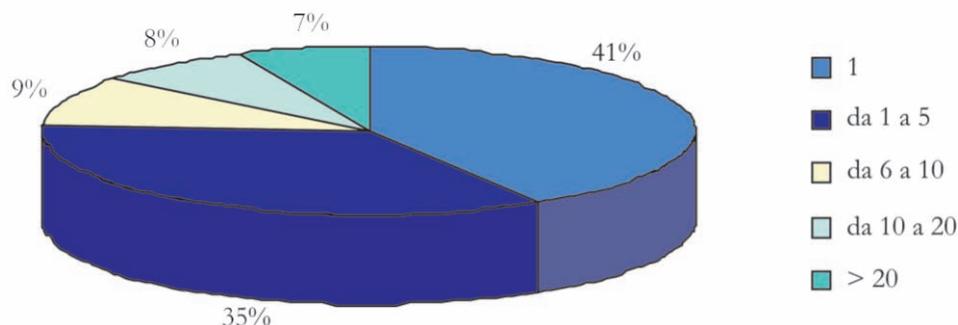


Fig. 7 - Numero di fenomeni di sinkholes per area suscettibile.  
 - Sinkholes phenomena number in the prone areas.

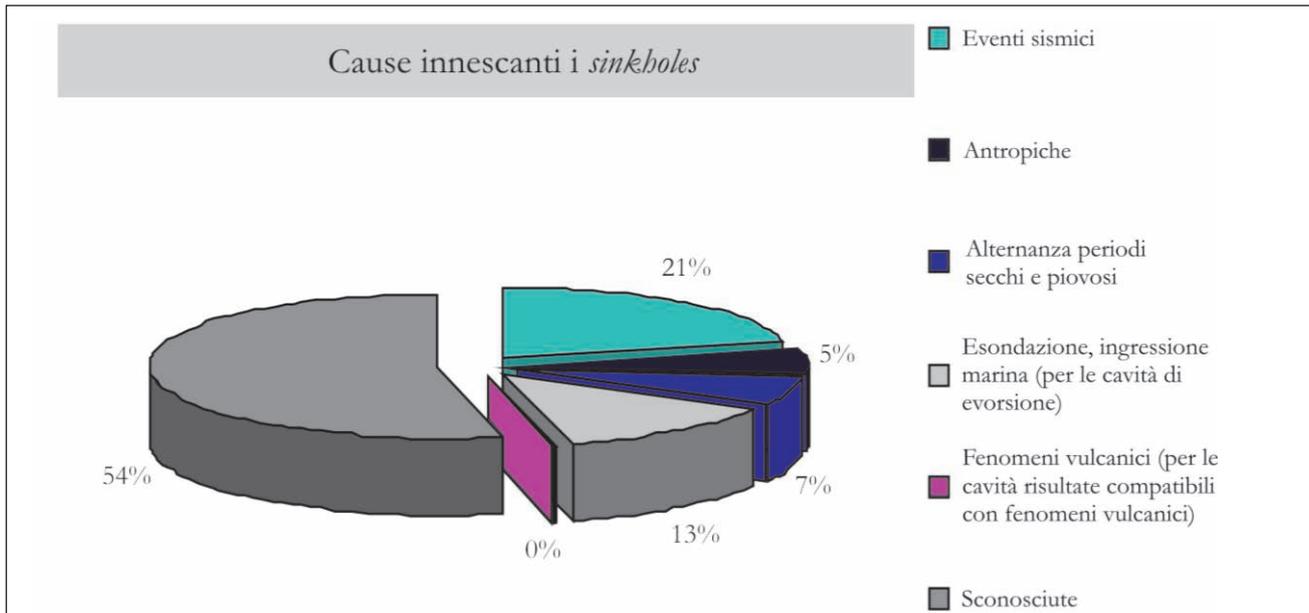


Fig. 8 - Distribuzione percentuale delle cause innescanti i sinkholes.  
 - Distribution in % of the sinkholes triggering causes.

Più del 30% delle cavità sono colmate da acque, si trasformano così in piccole pozze o laghi (*sinkhole ponds*; fig 13). Solo una piccola percentuale di casi è stata riscontrata allo stato attivo o giovanile, la gran parte dei casi risulta con diametro e profondità in riduzione (fig. 13). La morfologia delle voragini nella maggior parte dei casi è stata riscontrata di forma sub-circolare e relativa ad un evento singolo (fig. 13).

In alcuni casi, sono presenti sorgenti al fondo, con acque ricche in gas (H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub>), che rendono i laghi perenni. Altre volte l'alimentazione, dovuta a falde superficiali, determina oscillazioni stagionali di livello.

Sono state analizzate le acque all'interno di molte depressioni allagate ed è stato possibile individuare tre gruppi di acque. Il primo caratterizza acquiferi superficiali, il secondo acquiferi di provenienza carbonatica, il terzo gruppo è costituito da acque forte-

mente mineralizzate (principalmente CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S) di origine profonda e risalenti in superficie attraverso un sistema di faglie o fratture (fig. 14).

Il 29 % dei *sinkholes ponds* mostra un TDS minore di 300 mg/l che è associabile ad acque superficiali, il 29% ha un TDS pari a circa 500 mg/l ed è colmato da acque provenienti dallo scorrimento in litologie carbonatiche; il 41 % invece mostra valori più interessanti del chimismo una mineralizzazione delle acque molto elevata dovuta alla circolazione in ambienti profondi e alla probabile risalita attraverso dislocazioni tettoniche. In altri casi le cavità rimangono asciutte sin dal momento della loro formazione.

La sintesi dei risultati ha permesso di formulare una prima classificazione in relazione ai meccanismi genetici di innesco e propagazione (fig. 15).

Raggruppamenti di *sinkholes* sono stati possibili considerando le caratteristiche morfologiche

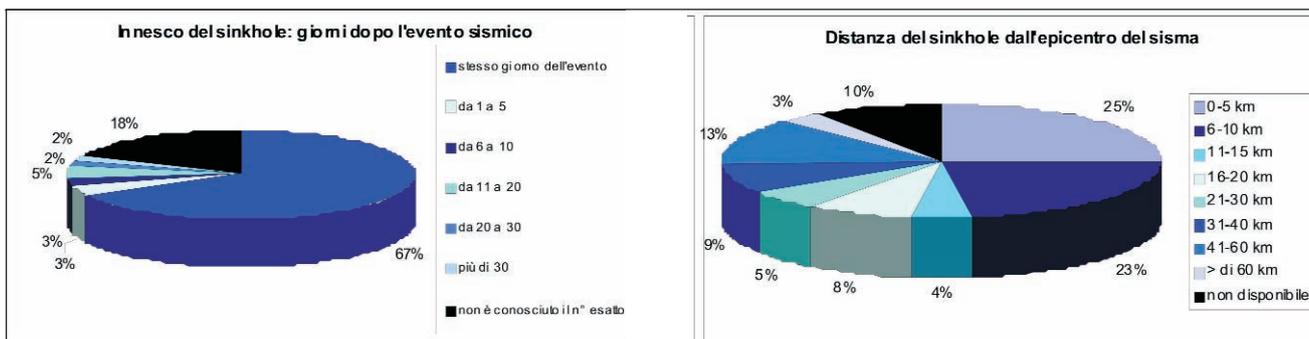


Fig. 9 - a) Correlazione tra l'apertura delle voragini e gli eventi sismici; b) Distanza del sinkhole dall'epicentro del sisma.  
 - a) Correlation between the opening of the sinkhole and the seismic event; b) Distance between the sinkhole and the earthquake epicentre.

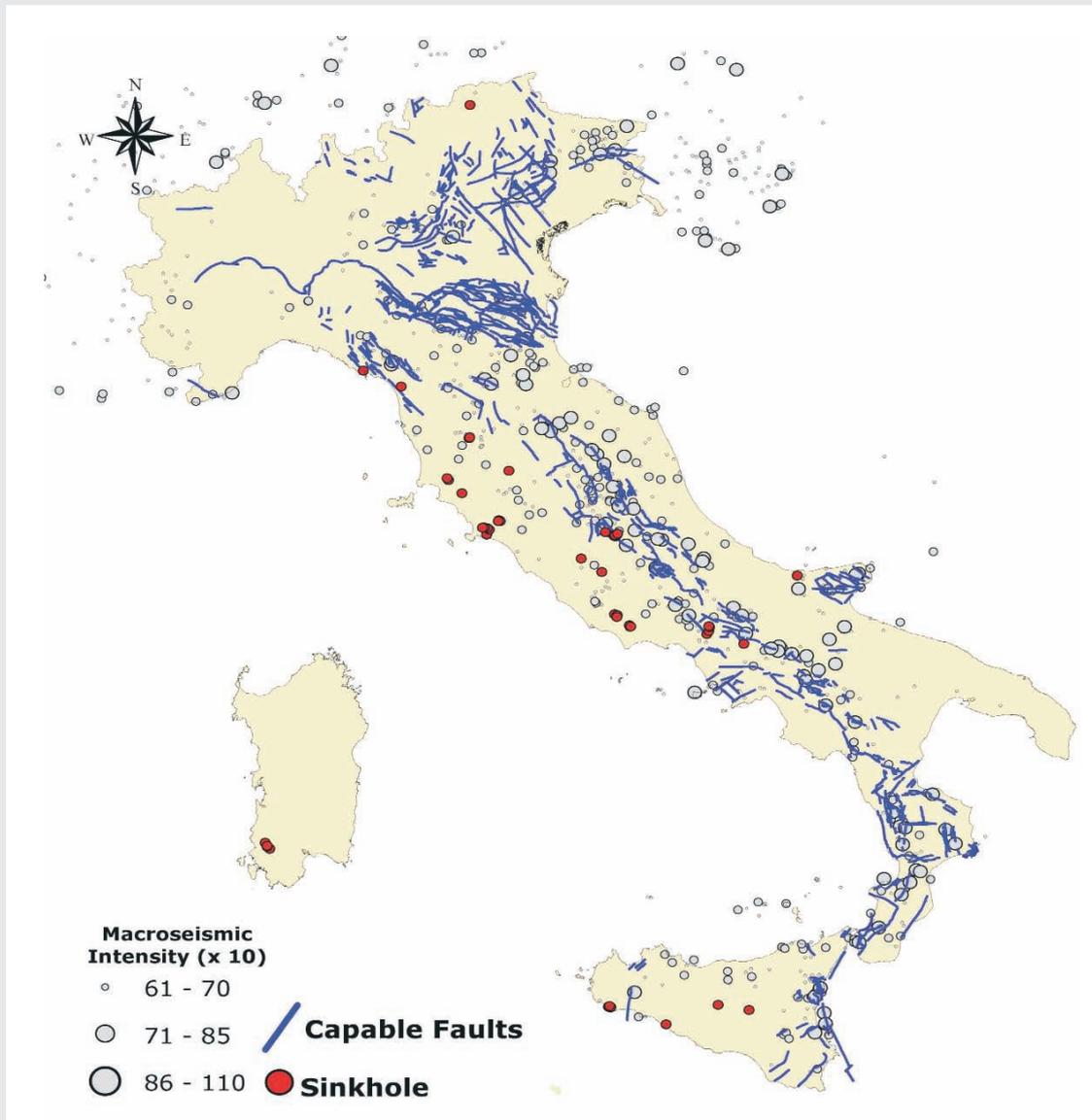


Fig. 10 - Distribuzione dei *sinkholes* innescati da eventi sismici e correlazione con i principali eventi sismici in Appennino.  
 - *Seismic sinkhole distribution an correlation with the principal epicentre of the Apennine earthquake*

delle cavità e quelle geologiche-idrogeologiche delle aree al contorno. A tal fine sono stati presi in considerazione gli elementi morfologici-geologici e sono stati raggruppati gli sprofondamenti censiti in 12 tipologie (fig. 16).

#### CONCLUSIONS

Many natural *sinkholes*, that seem not related to karst dissolution, have been identified in Italian plain areas, with a thick sedimentary cover on a

buried bedrock.

The main goal of this work was to study the geological, geomorphological and structural scenario of these areas to identify the possible genetic mechanism and evolution of these collapses.

About 850 cases have been individuated by research in historical archives, specific geological literature, and information from local administrations.

Geological, geomorphological and hydro-geochemical surveys have been conducted over

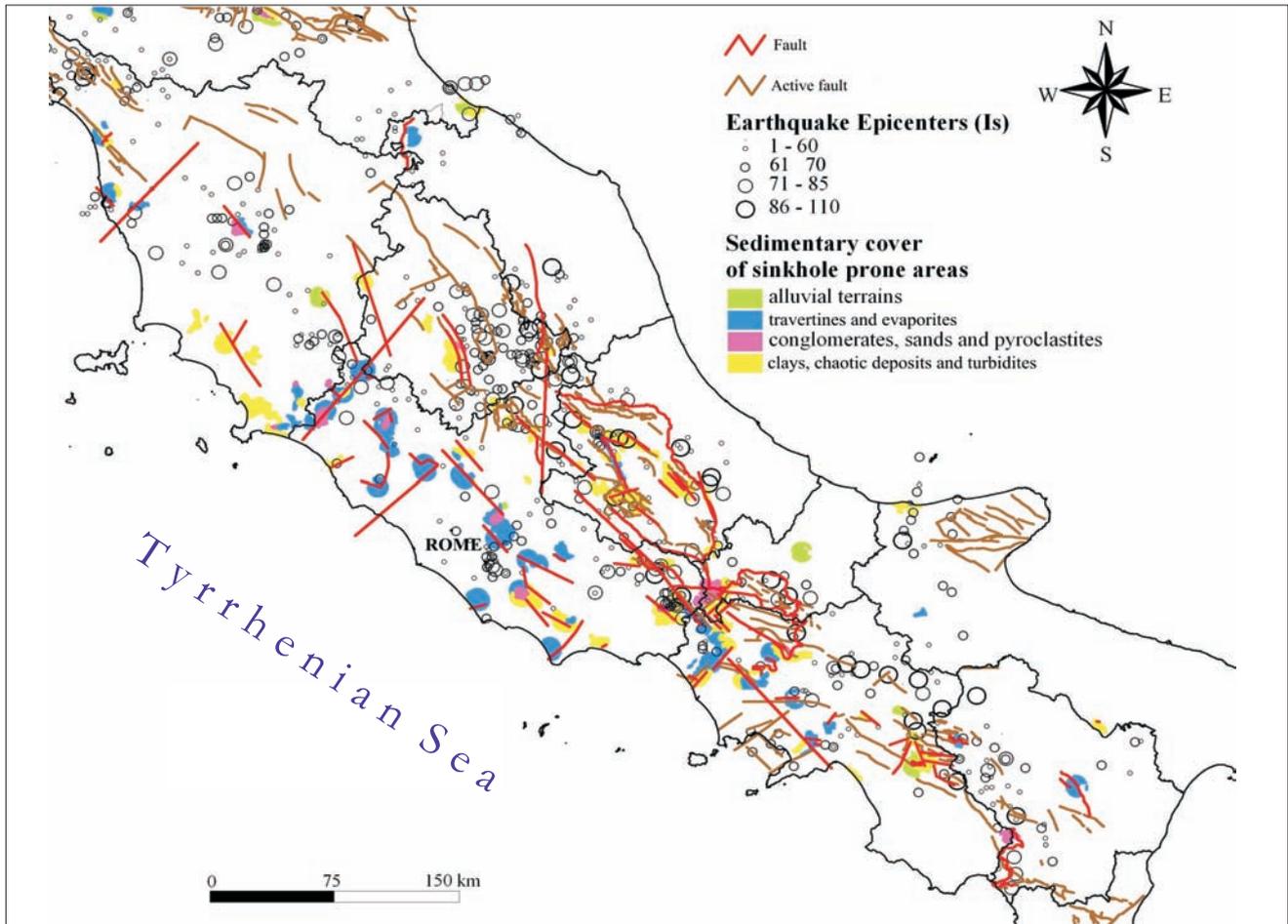


Fig. 11 - Allineamenti di aree suscettibili ai fenomeni di sprofondamento e principali linee tettoniche lungo il margine tirrenico dell'Appennino centro-meridionale.  
- Lineation of the sinkhole prone areas along the main faults of the Tyrrhenian margin of the central-southern Apennine.

350 cases, as well as literature borehole and seismic data have also been considered.

Few of these have been discarded because could be ascribed to karst dissolution, volcanic origin (i.e. maar), as well as to anthropogenic causes. Sinkholes in Italy show a widespread presence and have been recognized since a long time.

Historical information demonstrate the presence of catastrophic collapses since the Roman age. Collapses happen in the same areas, with gap of centuries between the phenomena. During this gap often there is a natural or artificial obliteration of the collapsed morphology. This is often the cause, together with the long time between the events, of loss of attention on this hazard.

Through the analysis of more than 350 cases has been possible to well identify the geological, hydrogeological and structural setting of the sinkhole prone areas.

In central Italy *sinkholes* are found mainly along the Tyrrhenian zone, particularly in Latium, Tuscany, Campania regions and in some areas

inside the Apennine chain. Other phenomena have been recognized in Liguria, Sardinia and Sicily.

In Sicily and in Puglia districts the geological setting is mainly characterized by the presence of permeable covers overlying evaporitic sediments (i.e. gypsum).

The periadriatic zone, with the exception of some cases in Puglia region, does not seem to be subjected to *sinkholes*.

The geological, structural, geomorphological and hydrogeological setting of the *sinkholes* prone areas shows recurring features. Sinkholes are found mainly in alluvial tectonic plains bordered by carbonatic ridges. The alluvial cover is usual very thick (more than 150 meters of clay-silt and sand-silt). There is a strong underground water flow with confined and unconfined aquifers and some high mineralized and geothermal fluids. Active faults of local and regional importance have been found.

About the triggering processes there are both natural and artificial causes. Seismic activity,

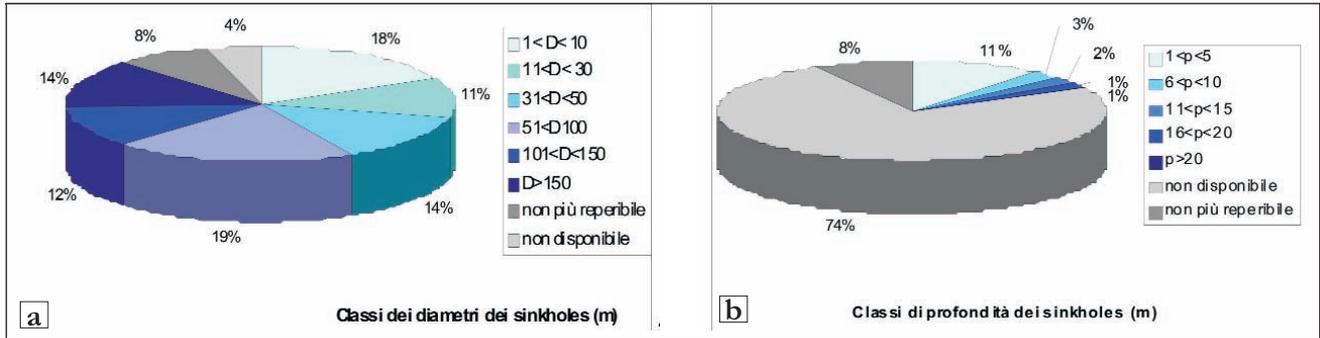


Fig. 12 - a) Distribuzione delle classi di diametri dei sinkholes censiti; b) distribuzione della profondità in alcune cavità indagate.  
 - a) Diameter classes distribution of the sinkholes censied; b) deep distribution in some sinkholes.

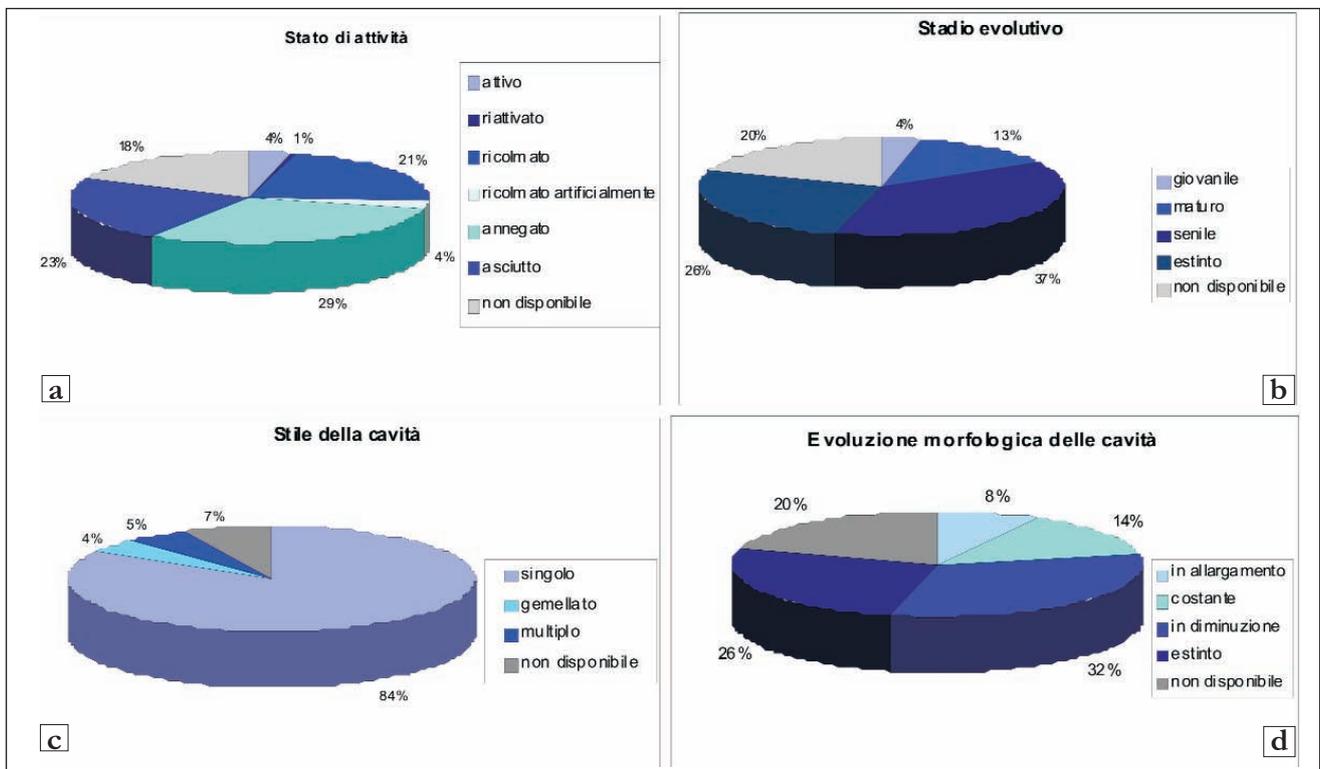


Fig. 13 - a) Stato di attività dei fenomeni di sinkholes studiati; b) Stato evolutivo dei sinkholes; c) morfologia della voragine; evoluzione del sinkhole; d) evoluzione morfologica delle voragini.  
 - a) State of activity of the studied sinkholes; b) sinkholes evolution state; c) sinkhole morphology; d) sinkhole morphology evolution.

flooding or anthropic activities may cause catastrophic collapses.

Field measurements and data obtained from the literature highlight a wide range of values of diameters (from few meters up to more than 200) and depth (from few meters up to 50). Usually the cavities show small diameters and depth and are water filled. The cover sediments litology are mainly of alluvial genesis with mixed granulometry and, eventually, travertine lenses.

The bedrock, differing from other European

countries and USA, lies at high depth under the superficial cover (more than 100 meters).

The study of several cases allow us to suggest some hypothesis about the genetic and triggering causes of the sinkholes. Hereby we present a first proposal of sinkholes typology classification in Italy.

The presence of regional faults with associated fractures, acting as preferential pathways for deep gas (i.e. CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S) migration, has been recognized in many cases.

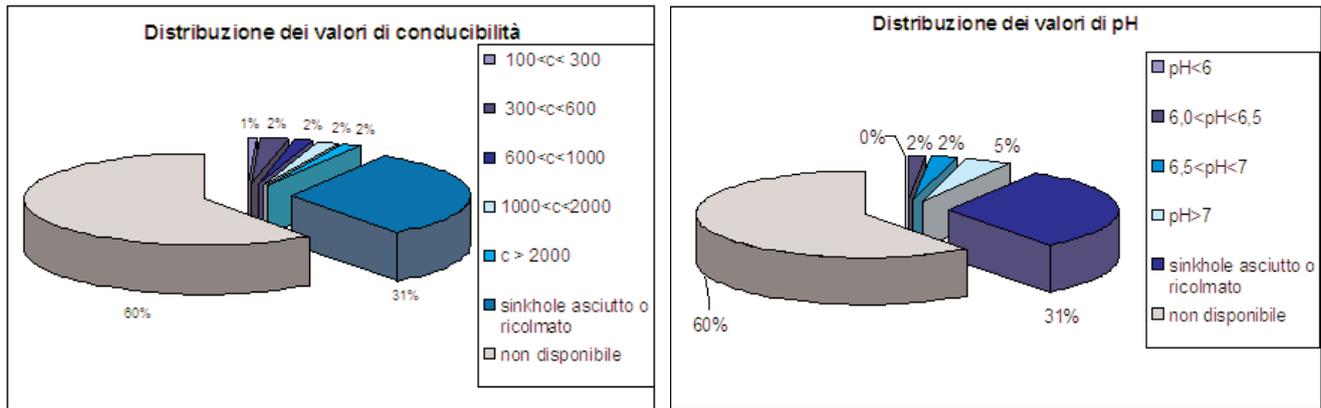


Fig. 14 - Distribuzione dei valori di pH e di conducibilità in alcuni *sinkhole* allagati.  
- *Downing sinkholes pH and conductivity distribution.*

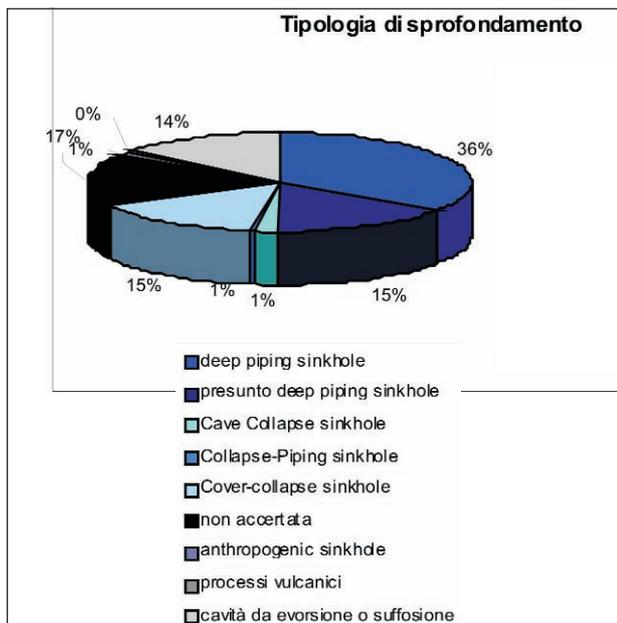


Fig. 15 - Prima classificazione dei fenomeni censiti.  
- *The first classification of the censied sinkhole phenomena.*

Many of the studied *sinkholes* are characterized by the presence of water inside the cavities that create ponds or small lakes. This water may originate from deep aquifers hosted in the carbonatic bedrock or can derive from shallow or perched aquifers in the cover (i.e. gravel water saturated lenses, sand layers etc.) or from surficial streams that feed the pond. Sometimes the water body represents just the run-off deposit after a rain period.

The ponds feed by the regional aquifer are permanent and often host underwater springs, instead the *sinkholes* flooded by surficial water show seasonal fluctuations of the water level and, in some cases, are dry during the summer.

Usually there are not strong streams as inlets or outlets of the ponds, the water flows just through the inner voids of the sediments surrounding the sinkhole. This flow could enlarge the sinkhole due to the mechanical erosion of the boundaries.

The typology of the water may be divided in three main groups: a first group is represented by the very shallow aquifers or the surficial waters, including the rainfalls; a second group clusters the karst waters hosted in deep seated carbonatic bedrocks; the third group collects mineralized waters usually derived from the mixing of the karst waters with fluids (mainly  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{S}$ ) of deep origin raised through faults and tectonic displacements.

The first group waters are distinguished by a very low value of total dissolved solids (TDS) and pH around 7. Sometimes the pH drops down 7 for the influence of organic acids like those released by peat layers. Little increments of TDS are due to the presence of mineral rich sediments covers washed by the surface streams or the rainfalls. This is typical in the *sinkholes* hosted in pyroclastic deposits.

The waters hosted in carbonatic bedrocks are characterized by a medium TDS, pH values neutral or basic. The main ion concentration is  $\text{HCO}_3^{2-}$  and  $\text{Ca}^{2+}$  for the dissolution of the calcareous rocks by the circulating water.

The high mineralized waters could be very acidic (pH value may be less than 3) with high levels of  $\text{CO}_2$  as dissolved and free gas. Medium or high levels of  $\text{H}_2\text{S}$  are also present. These fluids are deep seated and sometimes are of geothermal origin. The acidic fluids increase the aggressiveness of the waters enhancing the chemical dissolution of the carbonatic fraction of the sediments and rocks. In these cases *sinkholes* may develop quickly and reach imposing dimensions.

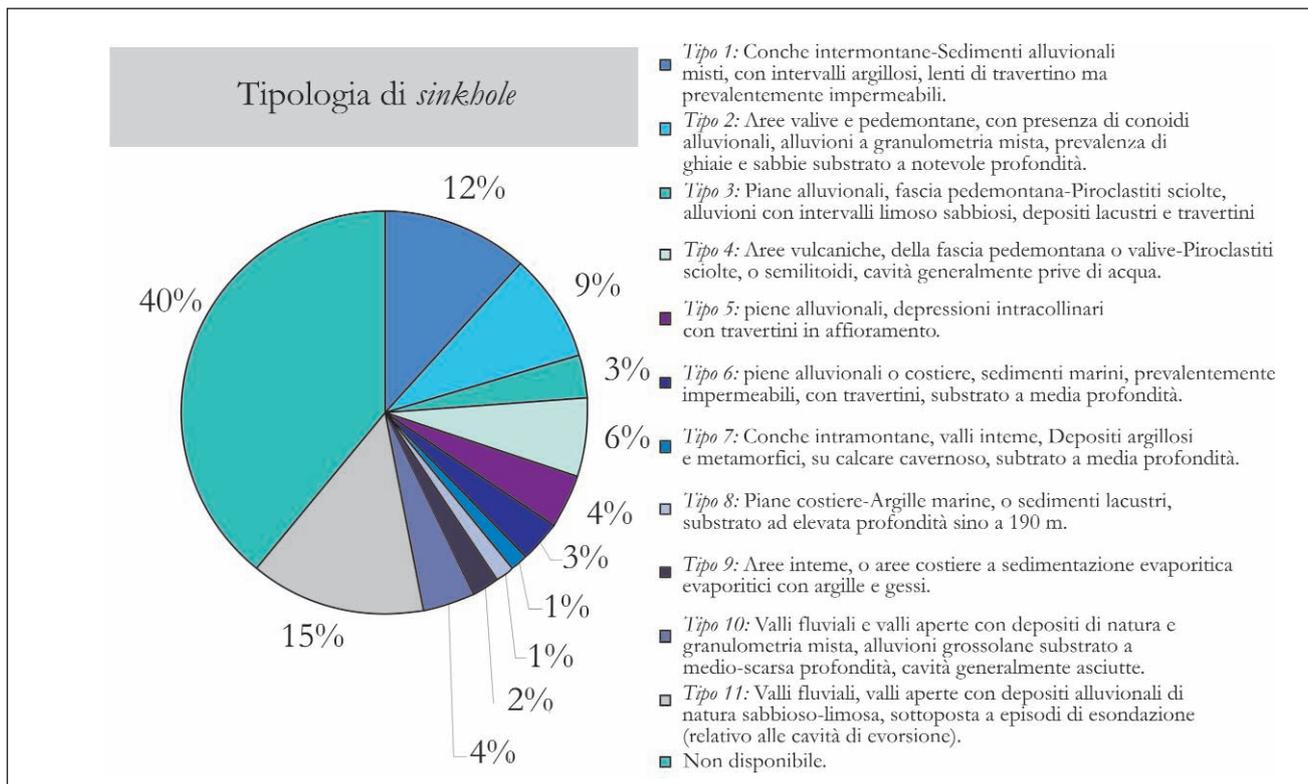


Fig. 16 - Raggruppamenti di *sinkholes* in relazione alle caratteristiche morfologiche e geologiche della cavità e allo scenario morfologico e geologico-idrogeologico dell'area suscettibile.

- *Sinkhole gathering in relation to morphological and geologica characteristic, to morphological scenario, and to geological-hydrogeological context of the sinkhole prone area.*

Of the studied *sinkholes* 29% shows a TDS less than 300 mg/l that is typical of superficial waters, 29% have a TDS around 500 mg/l and are filled by waters circulating in the calcareous bedrock, 41% show high mineralization of the water due to the presence of raising deep fluids. In these last cases mineralized springs are usually located close to the *sinkholes* and are aligned along tectonic

displacements.

It was possible to make a first classification of the Italian sinkhole phenomena in base at the genetic mechanism.

At the end it was possible make gathering of the *sinkholes* considering the morphological and the geological-hydrogeological characteristic of the collapses and of the sinkhole prone areas.

