

Sinkholes provocati dal crollo di cavità sotterranee nell'area metropolitana a nord est di Napoli (Italia Meridionale)

Sinkholes due to the collapse of underground cavities in the metropolitan area Northeast of Naples (Southern Italy)

GUARINO P.M. (*), SANTO A. (**)

RIASSUNTO - L'area metropolitana di Napoli è un'area densamente urbanizzata, interessata da frequenti fenomeni di *sinkhole* causati dal collasso di cavità sotterranee.

Relativamente al settore nord-orientale di essa, è stato svolto uno studio finalizzato ad aggiornare il *database* sulle cavità sotterranee, a costruire un modello geologico e stratigrafico di dettaglio del sottosuolo, a recuperare informazioni di *sinkhole* storici e ad analizzare i dati sugli sprofondamenti recenti, allo scopo di definire ruolo e peso dei fattori predisponenti e delle cause scatenanti l'insorgere dei *sinkhole*.

Nell'area di studio, il primo indiscusso fattore predisponente il verificarsi di *sinkhole* è la presenza ad una profondità modesta dal piano campagna della formazione tufacea dell'Ignimbrite Campana, sede di una complessa rete di cavità sotterranee.

Il secondo fattore predisponente è legato alla profondità ed alle dimensioni delle cavità: minore profondità del tetto della cavità rispetto al piano campagna e maggiore frequenza e ampiezza delle cavità possono favorire maggiormente l'insorgere di un *sinkhole*.

Tra i fattori predisponenti va annoverato il ruolo svolto dagli accessi alle cavità, dati da pozzi verticali, che costituiscono i punti di maggiore debolezza della volta della cavità, soprattutto quando sono stati oblitterati o riempiti in maniera sommaria e abbandonati.

Tra le cause scatenanti vanno inserite le intense piogge, che attraverso il cattivo funzionamento dei recapiti fognari possono saturare i terreni sabbioso-limosi in cui sono scavati i pozzi di accesso, le perdite delle condotte idriche in pressione, le forti vibrazioni e gli scuotimenti del terreno dovuti al passaggio sulle strade di mezzi pesanti oppure alla esecuzione di lavori di manutenzione.

Lo studio svolto permette di individuare, all'interno dell'area

metropolitana napoletana, le aree maggiormente suscettibili a *sinkhole*, in relazione alle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo ed alla concentrazione di cavità nel sottosuolo.

PAROLE CHIAVE: sinkholes antropogenici; cavità; pericolosità da sinkhole; Napoli; Italia Meridionale

ABSTRACT - The metropolitan area of Naples is a densely urbanized one, affected by frequent sinkhole phenomena caused by the collapse of underground cavities.

Relatively on its northeastern sector, a study finalized to: update the database of underground cavities, build a geological and stratigraphic detailed model of the subsoil, retrieve historic information about sinkhole and analyze recent events has been carried out in order to define the role of predisposing and triggering factors of sinkhole.

In the study area, the first unquestioned predisposing factor of the occurrence of sinkholes is the presence of the tuff formation of Campanian Ignimbrite at small depth from the ground level, place of a complex network of underground cavities.

The second predisposing factor is related to the cavities' depth and size: lower depths of the roof of the cavity and higher frequency and amplitude of the cavities may further facilitate the triggering of a sinkhole.

Among predisposing factors should be counted the role played by the accesses to the cavities, constituted by vertical wells, mostly when they have been filled in summary way and abandoned.

On the other hand, triggering factors include: heavy rains and failures of the sewer sewage that can provoke the saturation of sandy-loam soils in which wells were dug; leaks from water pipelines; strong vibration and shaking of the

(*) ISPRA - Institute for Environmental Protection and Research (Rome, Italy) - paolomaria.guarino@isprambiente.it

(**) DICEA - Department of Civil, Construction and Environmental Engineering "Federico II" University (Naples, Italy) - santo@unina.it

ground due to the passage of heavy vehicles or to the execution of maintenance works.

Finally, this work allows to define most susceptible areas to sinkhole, in relation to the stratigraphic characteristics of the subsoil and the concentration of cavities in the subsoil, generally matching with historic city centers.

KEY WORDS: anthropogenic sinkholes; cavity; sinkhole hazard; Naples; Southern Italy

1. - INTRODUZIONE

Gli sprofondamenti o “sinkhole” sono fenomeni improvvisi, difficilmente prevedibili e costituiscono un serio fattore di rischio, non sempre tenuto nella giusta considerazione.

Negli ultimi anni, in Italia, la comunità scientifica ha mostrato un crescente interesse su questa problematica, sia relativamente agli *anthropogenic sinkholes* in aree rurali (LOLLINO & PARISE, 2010; MAY *et alii*, 2010) che a quelli in aree intensamente urbanizzate (CORAZZA, 2004, 2010; AVERSA & D'ANIELLO, 2010; NISIO, 2010; GUARINO & NISIO, 2012; CIOTOLI *et alii*, 2013; PARISE *et alii*, 2013; LOLLINO *et alii*, 2013; SCOTTO DI SANTOLO *et alii*, 2013; AVERSA *et alii*, 2013).

Gli *anthropogenic sinkholes* sono presenti in Italia nelle aree interessate nel passato da attività estrattiva nel sottosuolo, dove esso risulta costituito da rocce facilmente lavorabili e allo stesso tempo di buona consistenza, quali i tufi piroclastici, le calcareniti, sabbie e limi e arenarie tenere. In alcune regioni (Lazio, Campania, Toscana, Umbria) sono numerosi i cunicoli e le cavità scavati a partire dal VIII secolo a.C., in età etrusca, cui hanno fatto seguito ambienti ipogei realizzati in epoca romana e medievale, fin quasi ai giorni nostri. In alcuni regioni del territorio italiano i *sinkhole* si generano in aree minerarie dimesse, di estrazione di zolfo, salgemma o carbone come accade ad esempio in Sicilia e in Sardegna (DI MAGGIO *et alii*, 2010; CAREDDA *et alii*, 2010).

Le condizioni di rischio indotte dagli sprofondamenti sono naturalmente connesse alla presenza e alla densità di insediamenti e/o infrastrutture presenti in superficie.

Con l'urbanizzazione successiva alla seconda guerra mondiale, in quasi tutti i principali centri abitati si è assistito a notevoli alterazioni del territorio e contemporaneamente alla perdita della memoria storica relativa alla presenza di cavità e dei loro punti di accesso, e nuove costruzioni ed importanti infrastrutture sono state realizzate spesso senza tener conto della presenza di vuoti in sottosuolo e dei possibili problemi di staticità collegati.

Nonostante la frequenza degli accadimenti e, talora, la perdita di vite umane, in Italia non esiste

ancora una normativa nazionale che riguardi il rischio da *sinkhole*.

Allo stesso tempo, fatta eccezione per alcuni casi specifici, come la Regione Lazio e la regione Sardegna, gli organismi scientifici e gli Enti pubblici non hanno redatto linee guida sugli studi da realizzare in presenza di *sinkhole*. Anche le Autorità di Bacino competenti sul territorio, a parte pochi casi, non prevedono una zonazione in classi di pericolosità e di rischio da *sinkhole*, come invece avviene da molti anni, e con dettaglio, per il rischio idrogeologico, normato attraverso i Piani di Assetto Idrogeologico. Ne deriva una scarsa attenzione sia da parte dei cittadini che degli amministratori e, aspetto più significativo, la mancanza di chiare responsabilità sulle azioni da intraprendere per mitigare il rischio *sinkhole*.

La conoscenza dei meccanismi che favoriscono e/o determinano la formazione di un *sinkhole* è importante sia ai fini di una zonazione di carattere generale del territorio che al fine della realizzazione di interventi, soprattutto nelle aree a elevata densità di urbanizzazione nelle quali è indispensabile avere un dettagliato modello della geologia del sottosuolo.

Un esempio di area intensamente urbanizzata interessata da sprofondamenti di origine antropica è dato dalla provincia di Napoli, dove esiste una estesa rete di cavità sotterranee spesso interessate da crolli e dove l'indice di densità abitativa supera i 13.000 abitanti/km². In quest'area i numerosi dati disponibili hanno permesso di realizzare uno studio che ha evidenziato quali sono i fattori che possono favorire la formazione di *sinkhole*, ed allo stesso tempo consente di proporre linee guida delle azioni e delle indagini geologiche da eseguire per la mitigazione del rischio associato.

Lo studio riassume i primi risultati di un Progetto di Ricerca in corso, condotto da ISPRA, l'Università “Federico II” e la Provincia di Napoli, che ha come obiettivo finale l'elaborazione di una carta della suscettibilità a fenomeni di *sinkhole* della provincia di Napoli.

2. - METODOLOGIE

La definizione di un modello geologico di dettaglio, il riconoscimento dei fattori predisponenti e di innesco degli sprofondamenti, la zonazione della pericolosità e la realizzazione degli interventi sul territorio costituiscono fasi essenziali del processo di mitigazione del rischio da *sinkhole*.

In tale contesto, la raccolta bibliografica ha rivestito un ruolo essenziale anche nel nostro caso nella realizzazione della ricerca, consentendo lo sviluppo di un *dataset* adeguato alle successive fasi di elaborazione.

Relativamente alla costruzione di un archivio di dati geologici del sottosuolo, il contributo principale è consistito nell'ampia documentazione già a disposizione degli Autori, acquisita nell'ambito di precedenti studi, e comprende oltre 300 *logs* stratigrafici, risultati di indagini geotecniche in sito e in laboratorio, studi e rilievi in cavità, ulteriormente ampliata grazie ai dati forniti da professionisti e società operanti in loco, che hanno messo a disposizione il materiale allestito per la redazione di Piani Regolatori a scala comunale e di progetti di sistemazione e consolidamento a scala locale.

Per quanto riguarda le cavità, la fonte principale di informazioni è stato il Censimento delle cavità sotterranee dei comuni dell'hinterland di Napoli (PROVINCIA DI NAPOLI, 2002).

Per quanto riguarda i *sinkholes*, la ricerca di eventi verificatisi in passato è stata svolta sia attraverso la ricerca bibliografica, che attraverso la consultazione di altre fonti.

Sono stati reperiti dati attraverso il progetto AVI (CNR, 2014) l'archivio dei fonogrammi dei Vigili del Fuoco (PROVINCIA DI NAPOLI, 2002), lavori esistenti in letteratura (ALBERTINI *et alii*, 1990; CATENACCI, 1992); tali informazioni sono state integrate attraverso la acquisizione di dati presso emeroteche, studi professionali e nel corso dei sopralluoghi.

Il materiale acquisito è stato georiferito e riportato in un GIS realizzato mediante il *software* ArcGis © ESRI. Per quanto riguarda i *sinkholes*, sono state inserite nel *database* tutte le informazioni reperite relative a: ubicazione, principali caratteristiche morfometriche, data di formazione e cause presunte. Altri dati sono stati raccolti nel corso di sopralluoghi in occasione del verificarsi di sprofondamenti.

Per le cavità sono state organizzate informazioni relative a: estensione, volume, altezza e profondità dal piano campagna, litologia e condizioni di stabilità, ubicazione degli accessi. In molti casi sono disponibili planimetrie e sezioni e, raramente, immagini fotografiche e rilievi sullo stato di fessurazione del tufo.

Relativamente ai dati stratigrafici e geologici s.l., sono stati inseriti nel *database* informazioni quali ubicazione, colonna stratigrafica delle perforazioni e profondità della falda.

Le carte vettoriali, i dati georiferiti e l'utilizzo di applicazioni GIS hanno permesso la realizzazione e la elaborazione di carte derivate, consentendo di visualizzare le aree a maggiore criticità e di capire quali sono le condizioni geologiche ed i fattori antropici che favoriscono la suscettibilità all'insorgere di un *sinkhole*, primo importante passo per le azioni da intraprendere per la mitigazione del rischio.

3. - L'AREA DI STUDIO

Buona parte del territorio della Provincia di Napoli è interessato dal rischio *sinkhole*, così come lo stesso capoluogo (BASSO *et alii*, 2013), ma il lavoro svolto riguarda una delle aree maggiormente colpite, comprendente il territorio dei comuni di Afragola, Arzano, Cardito, Casalnuovo, Casavatore, Casoria e Frattamaggiore, ubicata nel settore centro-orientale della Piana Campana (fig. 1).



Fig. 1 - Il settore centro-orientale della Piana Campana: in azzurro è evidenziata l'area di studio
- The central eastern sector of Campanian Plain: study area highlighted in blue.

Questo territorio, storicamente a forte vocazione agricola, ha subito nell'ultimo cinquantennio una marcata espansione edilizia, a sua volta legata ad una imponente crescita demografica che ha assunto percentuali di incremento della popolazione di oltre il 200% tra il 1951 e i giorni nostri, con una crescita complessiva da 122.329 abitanti nel 1951 a 297.217 abitanti nel 2011, e una densità di popolazione che frequentemente supera i 15,000 ab/km² (ISTAT, 2011).

Alla sottrazione delle aree agricole operata dallo sviluppo dell'edilizia (spesso abusiva) non è stata affiancata la qualificazione dei centri urbani che, al contrario, hanno perso l'originaria identità culturale e urbana legata anche alla presenza di masserie fortificate e castelli, e hanno acquisito i caratteri di periferie degradate.

Inoltre, la realizzazione dei nuovi insediamenti abitativi non è stata accompagnata dal contestuale adeguamento di infrastrutture essenziali, come la rete fognaria, per non parlare di spazi e strutture destinate ad attività sociali, spesso inesistenti.

3.1. - ASSETTO GEOLOGICO

La Piana Campana è un esteso territorio prevalentemente sub pianeggiante che si estende dalle pendici del Somma-Vesuvio fino ai confini settentrionali della Campania con la regione Lazio, che costituisce - da un punto di vista strutturale - un'ampia e profonda depressione individuata in seguito alle fasi tettoniche Plio-Pleistoceniche che hanno determinato lo smembramento e il successivo sprofondamento di alcune migliaia di metri delle unità calcaree e terrigene meso-cenozoiche dell'Appennino Campano (ROMANO *et alii*, 1994).

I terreni che colmano il *graben* sono costituiti in profondità da successioni terrigene mio-plioceniche e, superiormente, da alternanze di prodotti piroclastici, depositi marini e alluvionali (BELLUCCI, 1994; ROMANO *et alii*, 1994; PUTIGNANO *et alii*, 2007; SANTANGELO *et alii*, 2010).

La presenza di potenti successioni vulcaniche è dovuta al fatto che, ai movimenti tettonici si è associata, nel corso del Pleistocene medio-superiore, la risalita di magma, con la formazione dei centri vulcanici di Roccamonfina, Campi Flegrei e Somma-Vesuvio, alcuni dei quali ancora attivi (DE VIVO, 2006). L'attività spesso esplosiva di questi vulcani ha condizionato la stratigrafia e la morfologia della piana campana che risulta costituita per i primi 40-50 metri di profondità da prodotti piroclastici messi in posto con meccanismi da flusso piroclastico (*flow*) e da caduta (*fall*).

L'area di studio è costituita, morfologicamente, da un *glacis* a debole pendenza inclinato verso i quadranti settentrionali, compreso tra le colline flegree ad ovest e l'edificio vulcanico del Somma-Vesuvio ad est (fig. 2).

Nel sottosuolo dell'area di studio è presente, ad un profondità variabile da pochi metri sino a circa

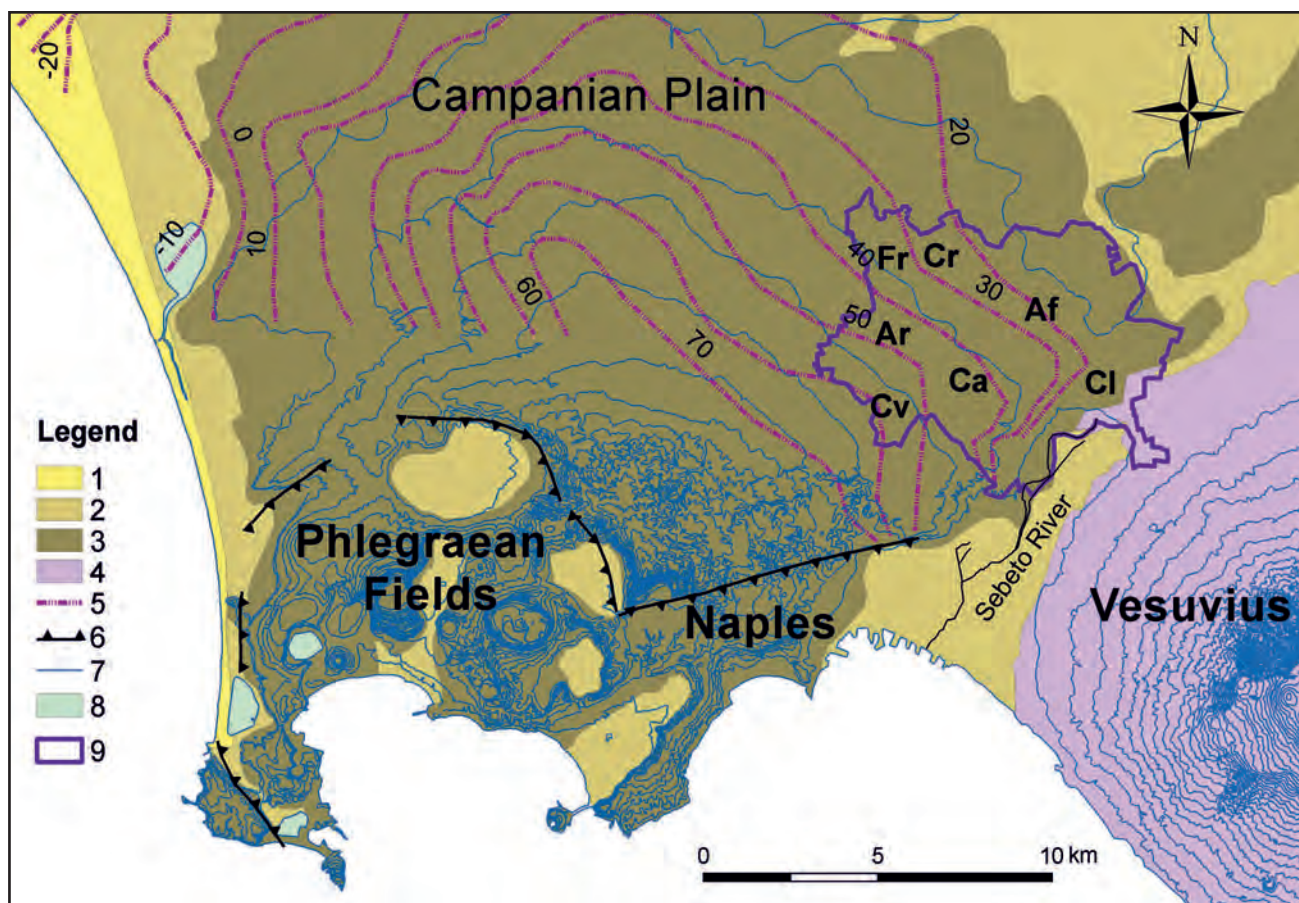


Fig. 2 – Carta geologica semplificata del settore centrale della Provincia di Napoli. Legenda: 1) depositi costieri (Olocene); 2) depositi alluvionali e colluvioni (Olocene); 3) depositi piroclastici e tufi relativi alla attività vulcanica dei Campi Flegrei in giacitura primaria o con vario grado di rimaneggiamento (Pleistocene superiore – Olocene); 4) depositi piroclastici e lave relativi alla attività vulcanica del complesso Somma-Vesuvio (Pleistocene superiore – Olocene); 5) tetto della formazione dell'Ignimbrite Campana (metri sul livello del mare); 6) orlo della caldera di collasso vulcano-tettonico dell'Ignimbrite Campana; 7) curve di livello (equidistanza = 25 m); 8) laghi; 9) area di studio (Af = Afragola, Ar = Arzano, Ca = Casoria, Cr = Cardito, Cl = Casalnuovo, Cv = Casavatore, Fr = Frattamaggiore).

– Simplified geological map of Naples' Province central sector. Legend: 1) coastal deposits (Holocene); 2) alluvial and colluvial deposits (Holocene); 3) pyroclastic deposits and tuffs belonging to Phlegraean Fields volcanic activity (Upper Pleistocene - Holocene) in primary level or with a variable degree of reworking; 4) pyroclastic deposits and lavas belonging to the Somma-Vesuvius activity (Upper Pleistocene – Holocene); 5) elevation contours of the top of Campanian Ignimbrite formation (meters above sea level); 6) Campanian Ignimbrite caldera; 7) contour lines (every 25 m); 8) lakes; 9) study area (Af = Afragola, Ar = Arzano, Ca = Casoria, Cr = Cardito, Cl = Casalnuovo, Cv = Casavatore, Fr = Frattamaggiore).

15 m dal piano campagna, la formazione dell'Ignimbrite Campana (IC) avvenuta 39 ky b.p., (DE VIVO *et alii*, 2001) che costituisce l'evento eruttivo principale dell'attività dei Campi Flegrei di tutto il Pleistocene sup. e Olocene, sormontata da depositi da *fall* quali cineriti, pomici e sabbie vulcaniche, di provenienza flegrea e vesuviana, frequentemente intercalati da *paleosuoli* di età prevalentemente olocenica.

Nella formazione dell'IC sono presenti intervalli con caratteristiche litologiche differenti legati alle dinamiche eruttive e deposizionali (BARBERI *et alii*, 1978; CIVETTA *et alii*, 1997): l'orizzonte più alto stratigraficamente è formato da cineriti grigie poco addensate con uno spessore di circa 2 metri; esse sfumano verso il basso ad un tufo lapideo di colore giallastro, dello spessore di 8 – 12 metri, ricco di pomici e scorie di grandi dimensioni (il diametro massimo può raggiungere alcuni decimetri di lunghezza). Tale tufo ha spesso una struttura vacuolare e si carota in elementi di 20-30 cm di lunghezza. Esso, per le sue buone caratteristiche geotecniche è stato oggetto in passato di diffusa attività estrattiva ed è, quindi, interessato da una fitta rete di cavità (fig. 3).

Verso il basso, il tufo assume, per uno spessore di circa 10 metri, una tonalità grigia e presenta una abbondante matrice cineritico-sabbiosa. In corrispondenza degli ultimi 5-10 metri, l'Ignimbrite Campana si presenta ricca di scorie e di grandi blocchi di lava trachitica, non facilmente carotabili.

In alcuni settori invece nella parte più profonda l'ignimbrite presenta una *facies* sabbiosa poco coerente, talora anche sede di falda acquifera.

Nel complesso, il tetto dell'IC presenta un alto orientato all'incirca NW-SE e nell'area di studio immerge verso i quadranti settentrionali digradando da una quota assoluta di 70 m s.l.m. sino a circa 10 m s.l.m. (v. fig. 2).

La presenza nel sottosuolo della formazione dell'IC si interrompe bruscamente verso Sud per effetto del collasso vulcano-tettonico successivo alla sua deposizione.

3.2. - CAVITÀ

La presenza della formazione tufacea dell'Ignimbrite Campana ad una ridotta profondità dal piano campagna ha da sempre favorito lo sviluppo dell'attività estrattiva finalizzata al reperimento di materiale da costruzione. In molti centri storici della provincia di Napoli, sino all'immediato secondo dopoguerra, le case sono state costruite in muratura utilizzando il tufo grazie alle sue buone caratteristiche geotecniche (limitato peso specifico e buona resistenza a compressione) e di isolante termico ed acustico.

L'estrazione del materiale avveniva attraverso una cava sotterranea generalmente ubicata in asse al futuro fabbricato oppure sotto la futura aia o cortile, a partire da uno scavo verticale di sezione quadrata e lato di circa 1 m, che giunto in prossi-

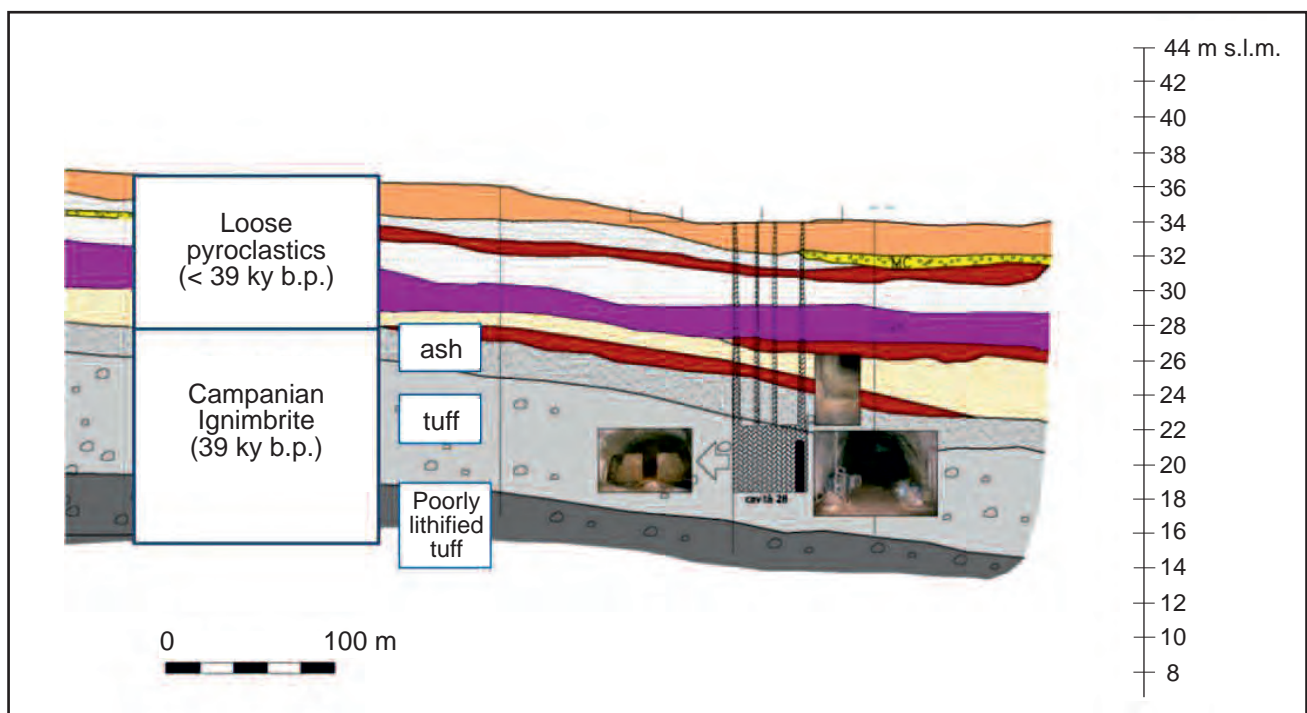


Fig. 3 – Le diverse *facies* che compongono la formazione dell'Ignimbrite Campana: le cavità sono scavate nella facies tufacea (Cardito: cavità n. 28).
- *Facies of Campanian Ignimbrite formation: caves were dug into tuff (Cardito: cavity n. 28).*

mità del tetto della formazione tufacea veniva ampliato realizzando una sorta di volta a botte, della quale la buca iniziale era una sorta di lucernaio (CANTILE, 1991).

L'estrazione permetteva il ricavo di mattoni per la muratura ed allo stesso tempo creava ambienti sotterranei che hanno avuto negli anni diversi utilizzi. Di fatto, quindi, quasi tutte le case dei centri storici avevano il loro locale sotterraneo del quale, purtroppo, col passare degli anni si è spesso persa la memoria storica.

L'accesso a queste cavità avveniva attraverso pozzi verticali (detti *occhi di monte*) e rampe di strette scale scavate nel terreno.

Il *dataset* di partenza relativo alle cavità sotterranee è costituito da un censimento realizzato dalla Provincia di Napoli, cui sono stati aggiunti ulteriori dati acquisiti presso studi professionali e società.

Nell'area di studio risultano censite 935 cavità, ma si tratta di un valore sottostimato rispetto alla situazione reale.

L'ubicazione delle cavità è riportata in figura 4. Le cavità appaiono fortemente concentrate in corrispondenza delle aree di più antica edificazione,

sia in prossimità dei centri storici, che lungo i più antichi assi viari. Soltanto nel 60% dei casi si dispone di un rilievo e di sezioni e, pertanto, di una planimetria riferita all'edificato sovrastante. In alcuni casi è disponibile anche una documentazione fotografica.

Del rimanente 40%, una buona percentuale, oltre a non essere stata mai rilevata, non risulta accessibile (tab. 1).

Sono stati censiti inoltre più di 3400 pozzi di accesso alle cavità sotterranee. Anche in questo caso, il numero è fortemente sottostimato, se si pensa che, ad esempio, nel comune di Arzano sono note 160 cavità e soltanto 14 pozzi di accesso.

Lo sviluppo in pianta delle cavità segue una geometria che varia da forme semplici, di tipo rettangolare, a forme complesse, generalmente del tipo "a griglia" (fig. 5); lo scavo presenta generalmente una sezione trapezoidale con altezza compresa tra 3 e 5 m, raramente maggiore. Relativamente alle dimensioni, il dato riguarda una percentuale inferiore al 50%, ed è caratterizzato dal prevalere delle dimensioni ridotte con $S < 500 \text{ m}^2$ (fig. 6).

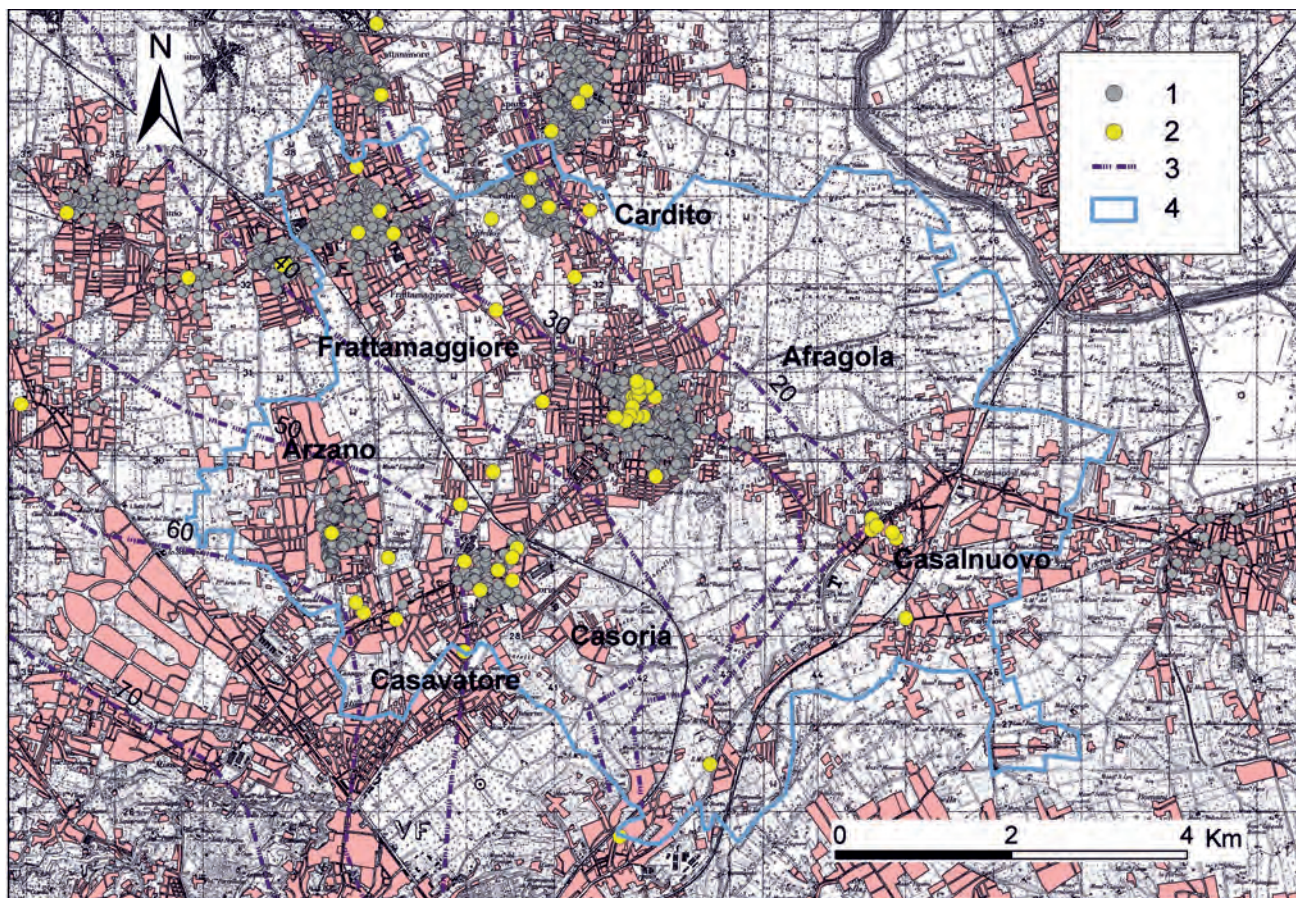


Fig. 4 – Ubicazione delle cavità e dei sinkholes nell'area di studio. Legenda: 1) cavità; 2) sinkholes; 3) tetto della formazione dell'Ignimbrite Campana (metri sul livello del mare); 4) limite dell'area di studio.

– The study area: cavities' and sinkholes' location. Legend: 1) cavity; 2) sinkholes; 3) elevation contours of the top of Campanian Ignimbrite formation (meters above sea level); 4) study area.

Tab. 1 - *Cavità e pozzi di accesso censiti nell'area di studio e relativo stato di conservazione (fonte dei dati: Provincia di Napoli, 2002 e ISTAT). Legenda: b= buono, d = discreto, c = cattivo, nd = non conosciuto.*
 - Cavities, access wells censused and related conditions (source: Provincia di Napoli, 2002 and ISTAT).
 Legend: b = good, d = fair, c = poor, nd = not definable.

Comune <i>Municipality</i>	Area (km ²)	Cavità Censite <i>censused cavities</i>	Cavità rilevate <i>inspected cavities</i>	Pozzi di accesso censiti <i>censused access wells</i>	Stato di conservazione delle cavità rilevate <i>cavities' conditions</i>			
					nd	b	d	c
Afragola	17.99	336	328	1.680	195	25	74	42
Arzano	4.68	160	5	14	155	4	0	1
Cardito	3.16	149	64	869	91	4	6	48
Casalnuovo	7.75	5	5	25	0	0	1	4
Casavatore	1.62	1	0	0	0	0	0	1
Casoria	12.03	84	19	94	62	14	2	6
Frattamaggiore	5.32	200	139	756	80	16	45	59
Totale	52.55	935	560	3438	583	63	128	161

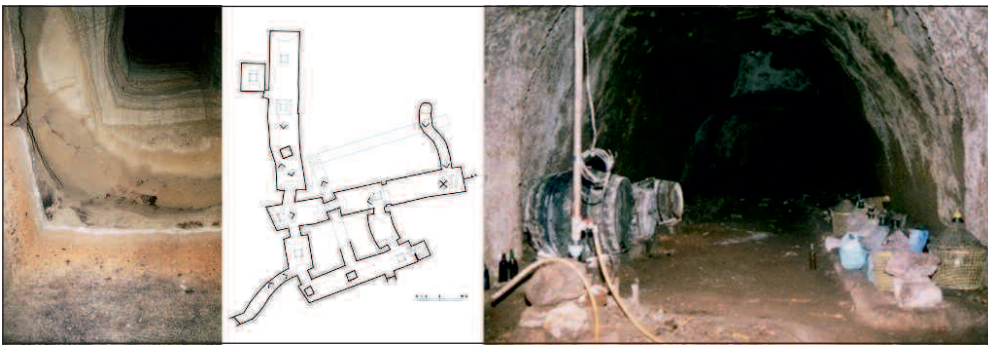


Fig. 5 – Esempi di forme di cavità scavate nel tufo.
 - Caves dug into the tuff: examples of shapes in plan.

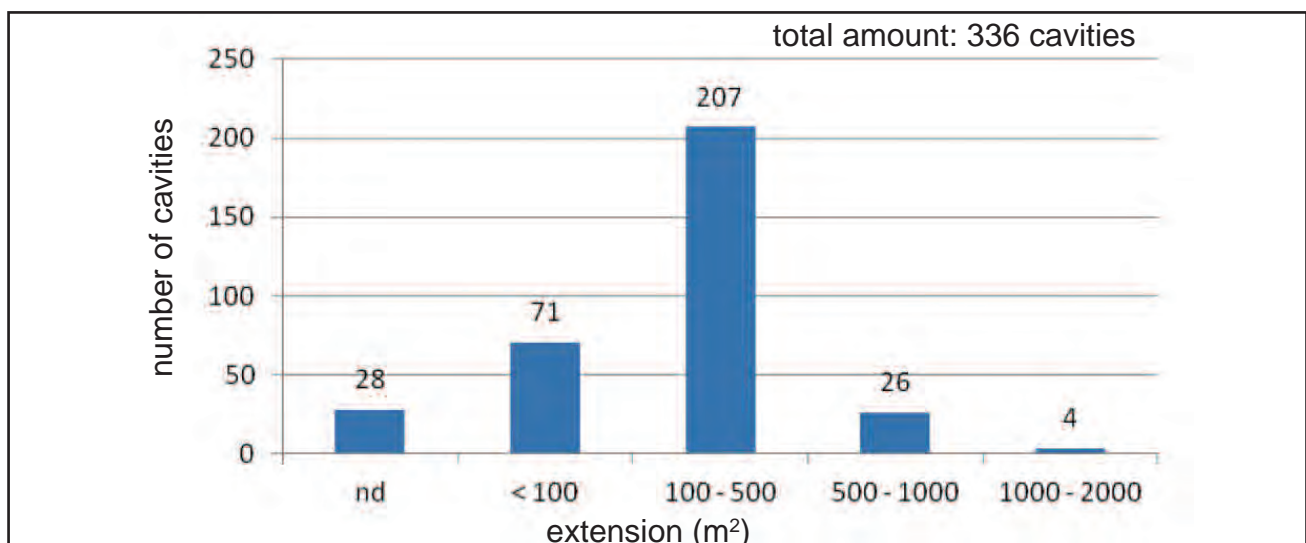


Fig. 6 – Estensione della superficie delle cavità sotterranee presenti nel territorio del comune di Afragola. L'asse delle ordinate indica il numero di cavità, l'asse delle ascisse indica la superficie (m²). Su un totale di 336 cavità, più del 80% è più piccola di 500 m².
 - Cavities' extension in Afragola Municipality. The y axis indicates the number of cavities, the x axis indicates the extension (m²). On a total of 336 cavities, more than 80% is smaller than 500 m square (nd = not inspected).

La profondità della volta delle cavità dal piano campagna è compresa tra 9 m e 13 m.

Lo stato di conservazione generale delle cavità non risulta noto in oltre il 60 % dei casi; tenuto conto del fatto che lo spessore di tufo che veniva lasciato in volta è dell'ordine del metro (o anche meno) solo in poco meno del 20% delle cavità ispezionate, le condizioni di stabilità sono state definite *buone* sulla base di osservazioni macroscopiche (v. tab. 1).

Risulta evidente quindi che molte cavità potrebbero trovarsi in precarie condizioni di stabilità, così come i loro pozzi di accesso, gli "occhi monte", ed in particolare, quelli abbandonati.

Si osserva infatti che, gli accessi alle cavità in uso, o rimasti in uso fino a pochi anni fa, risultano in buone condizioni di stabilità, mentre le canne di pozzo e gli accessi ormai obliterati costituiscono delle situazioni puntuali fortemente predisposte al collasso e alla formazione di un sinkhole in superficie (cfr § 3.3.1).

3.3. - SINKHOLES

Ai fini della realizzazione di una carta inventario dei *sinkholes*, non si è tenuto conto delle piccole voragini e dei dissesti legati alla manutenzione del territorio e dei sottoservizi, come ad esempio i cedimenti della sede stradale o del piano di calpestio di locali, giardini dovuti a perdite delle condutture interrate.

Sono stati presi in considerazione soltanto i fenomeni di sprofondamento profondo caratterizzati da almeno uno dei seguenti requisiti:

- a) profondità dello sprofondamento maggiore di 3 m;
- b) presenza di una cavità sotterranea che ha condizionato direttamente o indirettamente, lo sprofondamento.

Nell'area di studio sono stati censiti circa 100 *sinkholes* (v. fig. 4 e tab. 2). Si tratta di un numero certamente approssimato per difetto ed in corso di aggiornamento, tenendo conto che:

- i) per quanto riguarda la banca dati degli interventi del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco, le registrazioni degli interventi antecedenti al 1986 non sono state acquisite perché sono state irrimediabilmente distrutte dagli stessi uffici dei VVF;
- ii) il database del Progetto AVI non tiene conto dei fenomeni di sprofondamento, ad eccezione dei casi più importanti, che hanno provocato vittime o danni ingenti, e quindi fornisce poche segnalazioni;
- iii) gli uffici tecnici delle amministrazioni locali non possiedono un registro-anagrafe degli eventi.

Frequentemente, i dati acquisiti relativi ai fenomeni di sprofondamento meno recenti risultano privi di informazioni relative alla ubicazione. Ne

deriva una forte discrepanza tra il numero dei fenomeni riconosciuti e il numero dei fenomeni che è stato possibile ubicare nel GIS, che corrispondono a circa il 50% del totale dei fenomeni censiti.

L'ubicazione dei sinkhole si concentra nei centri storici degli abitati e con maggiore frequenza dove la profondità della formazione lapidea è meno elevata, per lo più in corrispondenza di strade, più raramente in cortili interni alle abitazioni.

Per quanto riguarda le dimensioni, purtroppo anche i dati morfometrici risultano poco numerosi (meno del 10% dei casi) e quindi scarsamente utili per una analisi di tipo quantitativo e statistico.

In generale il diametro è dell'ordine di 4 – 6 metri; la profondità varia in funzione della profondità del tetto della formazione tufacea dal piano campagna che, come si è visto nel §3.1 si riduce da oltre 30 metri nel settore di Napoli a circa 12 metri nel settore di studio.

Per quanto riguarda i danni provocati dai *sinkholes*, nella maggior parte dei casi, essi comprendono danni alle infrastrutture viarie ed il coinvolgimento parziale degli edifici, con conseguente inagibilità degli stessi e degli sfollati. Talora si è assistito al collasso strutturale e conseguente crollo degli edifici, con perdita di vite umane (tab. 3; fig. 7).

3.3.1. - Casi di studio

3.3.1.1. - Cardito, 6 gennaio 2012

L'assetto stratigrafico del sottosuolo di Cardito può essere schematizzato attraverso un modello geologico a due strati: il primo strato è costituito da una successione di depositi piroclastici sciolti, dello spessore compreso tra 10 e 15 m, riferibili a eruzioni vulcaniche flegree e vesuviane di età più recente di 39 ky b.p., costituiti da alternanze di livelli di sabbie, pomice, cineriti e paeosuoli.

Il secondo strato è dato dai prodotti, prima cineritici e poi tufacei, dell'Ignimbrite Campana (39 ky b.p.) che si approfondiscono sino a circa 30 m dal piano campagna. Nel complesso i due strati hanno una giacitura immergente verso i quadranti nord-orientali, circa parallela alla morfologia del piano campagna; in figura 8 viene riportato l'andamento del tetto della formazione tufacea.

La formazione del *sinkhole* del 6 gennaio 2012 in piazza Garibaldi è stata preceduta dalla rottura, alcuni giorni prima, di una conduttura fognaria e dal verificarsi di scricchiolii e rumori, circa 12 ore prima del crollo, di un'ala del fabbricato al civico 6. Tale edificio è stato evacuato poche ore prima del crollo; fortunatamente non si sono avute vittime.

In superficie, una volta avvenuto, lo sprofondamento non era ben visibile a causa della grande

Tab. 2 – *Sinkholes censiti. Per ciascun evento, la tabella riporta la data dello sprofondamento e, se possibile, ubicazione, diametro, profondità, fattore predisponente e/o di innesco riconosciuto, Comune. Legenda: A – rottura di acquedotto; C – collasso di cavità; PP – precipitazioni meteoriche intense; SS – rottura del sistema fognario; W – lavori di manutenzione.*
 - Sinkholes recorded. For each event, the table lists the following: date of sinkhole occurrence – and, if possible – location, diameter, depth, predisposing and/or triggering factor, municipality. Legend: A – aqueducts rupture; C – cavity collapse; PP – strong intensity rainfall; SS – Sewer system rupture; W – maintenance works.

data - date	ubicazione - location	diam - diam	prof. - depth	causa - factor	Comune - Municipality
novembre 1980		15			AFRAGOLA
maggio 1985					AFRAGOLA
7/24/86	Via Principe di Napoli				AFRAGOLA
10/19/86					AFRAGOLA
8/31/87				A	AFRAGOLA
10/11/87					AFRAGOLA
9/15/88					AFRAGOLA
12/16/88				SS+C	AFRAGOLA
2/4/89				SS+C	AFRAGOLA
8/31/89				SS+C	AFRAGOLA
12/10/89				SS+C	AFRAGOLA
12/12/89					AFRAGOLA
12/14/89					AFRAGOLA
11/20/92	Vicolo S. Maria 7				AFRAGOLA
2/3/93	Via P. Toselli 35			SS+C	AFRAGOLA
4/19/93	Via don Bosco 9			SS	AFRAGOLA
6/4/93	Via Sacri Cuori 27			SS	AFRAGOLA
6/22/93	Via Toselli 7			SS	AFRAGOLA
8/18/93	Via Antonio Guerra 44			SS+C	AFRAGOLA
9/17/93	Via Sacro Cuore 23 AeB				AFRAGOLA
10/12/93	Via A. Guerra 2			SS	AFRAGOLA
10/16/93	Via S. Maria 42			C	AFRAGOLA
10/26/93	Via Pasquale Borrelli 7			SS	AFRAGOLA
1/22/94	Via Gramsci 36				AFRAGOLA
4/24/94	Via G. dell'Aquila 7	3			AFRAGOLA
7/31/95	Via Mele 2			W	AFRAGOLA
10/17/95	Via Salicelle				AFRAGOLA
12/13/95	Via Mele 38				AFRAGOLA
2/3/96	Via P. Nudo 10				AFRAGOLA
7/23/96	Via Pigna				AFRAGOLA
12/15/96	Vicolo Mele 34				AFRAGOLA
7/31/10	Via Calvanese				AFRAGOLA
7/27/93	Via V. Emanuele 36			PP+C	ARZANO
6/13/96	Via Rettifilo al Bravo trav. Agnolo			SS	ARZANO
9/26/86	Via Molino 9			PP	CARDITO
9/26/86				PP	CARDITO
10/19/86					CARDITO
11/15/86				PP+C	CARDITO
10/10/87				W	CARDITO
10/26/90				A	CARDITO
12/8/92	4° trav. 1 Maggio			SS	CARDITO
3/11/93	Via S. Eufemia 23			A	CARDITO
7/2/94	Via P. Donadio 107			SS	CARDITO
4/30/97	Via Antico Belvedere 30			SS	CARDITO
1/7/12	Piazza Garibaldi 6	2		SS+C	CARDITO
giugno 2011	Corso Cesare Battisti 135	2	0.5		CARDITO

segue

1/9/86				P	CASALNUOVO
9/6/87					CASALNUOVO
1/27/88				SS	CASALNUOVO
11/19/89				C	CASALNUOVO
9/27/90					CASALNUOVO
4/7/92	Via Arcore 35			SS	CASALNUOVO
12/6/92	Via Strettola Romano 8				CASALNUOVO
5/3/93	Corso Umberto 200			SS	CASALNUOVO
5/7/93	Via Strettola Romano 8			SS	CASALNUOVO
3/8/93	Corso Umberto 105			C	CASALNUOVO
10/24/93	Via Vernicchi 69			SS	CASALNUOVO
3/7/95	Via Nazionale delle Puglie 20				CASALNUOVO
8/9/11	Via Romano Strettola	10	10		CASALNUOVO
3/19/12	Via Virnicchi	4	4		CASALNUOVO
2/5/88					CASAVATORE
9/13/88					CASAVATORE
10/27/90					CASAVATORE
4/20/92	Via B. Croce			A	CASAVATORE
10/6/92	Via Montessori 16-18			A+SS	CASAVATORE
10/22/93	Via S. Giovanni Esposito 46			SS	CASAVATORE
giugno 1977	Via S. Benedetto				CASORIA
1/21/86					CASORIA
11/4/86					CASORIA
2/22/87					CASORIA
2/7/88					CASORIA
7/26/88				SS	CASORIA
10/10/89	Via GB Vico			SS	CASORIA
3/1/90					CASORIA
3/28/90					CASORIA
3/31/90				C	CASORIA
4/3/90	Via G. Rocco			SS	CASORIA
9/29/92	Via S. Rocco 5			A	CASORIA
1/22/93	Via Martiri d'Otranto 3 trav. n.4			A	CASORIA
3/6/93	Via L. da Vinci 18			A	CASORIA
12/3/93	Via S. Pietro 9			SS	CASORIA
2/20/94	Corso Umberto 10			W+SS	CASORIA
6/25/96	Via Bissolati 58			SS	CASORIA
3/29/97	Corso Carlo Verre	6	40		CASORIA
4/11/97	Via Nazionale delle Puglie 36			A	CASORIA
6/5/97	Via Carlo Verre 2				CASORIA
8/22/97	Via Arpino 83				CASORIA
11/12/82	SP per Orta di Atella		4		FRATTAMAGGIORE
luglio 1984	Via Roma				FRATTAMAGGIORE
10/23/86				SS	FRATTAMAGGIORE
10/10/87					FRATTAMAGGIORE
2/2/89				SS	FRATTAMAGGIORE
11/24/89					FRATTAMAGGIORE
4/23/90				SS	FRATTAMAGGIORE
10/4/92	Via Biancardi				FRATTAMAGGIORE
12/19/93	Via Frattamaggiore 76				FRATTAMAGGIORE
2/24/95	Via Don Minzoni 37			W	FRATTAMAGGIORE
10/15/2000	Via Riscatto				FRATTAMAGGIORE

quantità di detrito che lo ricopriva. Nelle settimane successive l'intero edificio è stato abbattuto e l'area circostante è stata oggetto di indagini finalizzate alla definizione del rischio residuo a carico delle abitazioni circostanti, che hanno evidenziato (fig. 9):

1) l'assetto stratigrafico locale - in accordo con quello generale del territorio di Cardito - con una successione di depositi piroclastici sciolti dello spessore di 12 m a tetto della *facies* tufacea dell'IC;

2) la presenza di due cavità tra loro collegate che, con accesso da un edificio adiacente, si sviluppavano nella direzione del lato meridionale del fabbricato crollato. Le cavità risultavano censite nel database della Provincia di Napoli, ma non rilevate.

Tab. 3 – *Principali eventi recenti di sprofondamento che hanno provocati danni o perdita di vite umane.*

- Latest main sinkhole events that provoked damage or loss of human life.

Data - Date	Comune - Municipality	Danni provocati - Caused damages
7/13/13	Grumo Nevano	7 families evacuated
12/2/12	Miano	2 casualties
2/21/10	Frattaminore	Several families evacuated
7/31/10	Afragola	3 deaths
8/8/11	Casalnuovo	1 death

Tali cavità, scavate nel bancone tufaceo dell'IC, sono risultate solo in parte accessibili e in buona parte riempite di detriti. Non è stato pertanto possibile verificare il loro reale sviluppo e la presenza di ulteriori diramazioni.

3) l'assenza nelle immediate vicinanze di altre cavità. I profili di tomografia elettrica superficiale realizzati non hanno evidenziato l'esistenza di anomalie relazionabili alla presenza di vuoti e/o cavità nel sottosuolo.

In definitiva, si ipotizza che lo sprofondamento sia stato provocato dalla formazione di un vuoto all'interno delle piroclastiti sciolte, dovuta alle perdite della conduttura fognaria e favorita dall'azione di drenaggio svolta dalle cavità.

Il vuoto formatosi nel terreno, ancorché di limitate dimensioni (pochi metri di diametro e di altezza) è stato sufficiente a provocare il cedimento delle fondazioni dell'edificio.

3.3.1.2. – Afragola, 16 ottobre 1993

Le informazioni relative allo sprofondamento avvenuto il 16 ottobre 1993 ad Afragola derivano dal fonogramma del Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco. Lo sprofondamento provocò il cedimento del piano di calpestio dell'androne di un palazzo in via Santa Maria 42. Nella segnalazione dei VVF è annotato il riferimento alla presenza di una canna di pozzo.



Fig. 7 – Immagini relative ad alcuni dei principali sinkholes verificatisi nell'ultima decade, riportati in tab. 3.
- Some of main sinkhole phenomena occurred during last decade (see tab. 3).

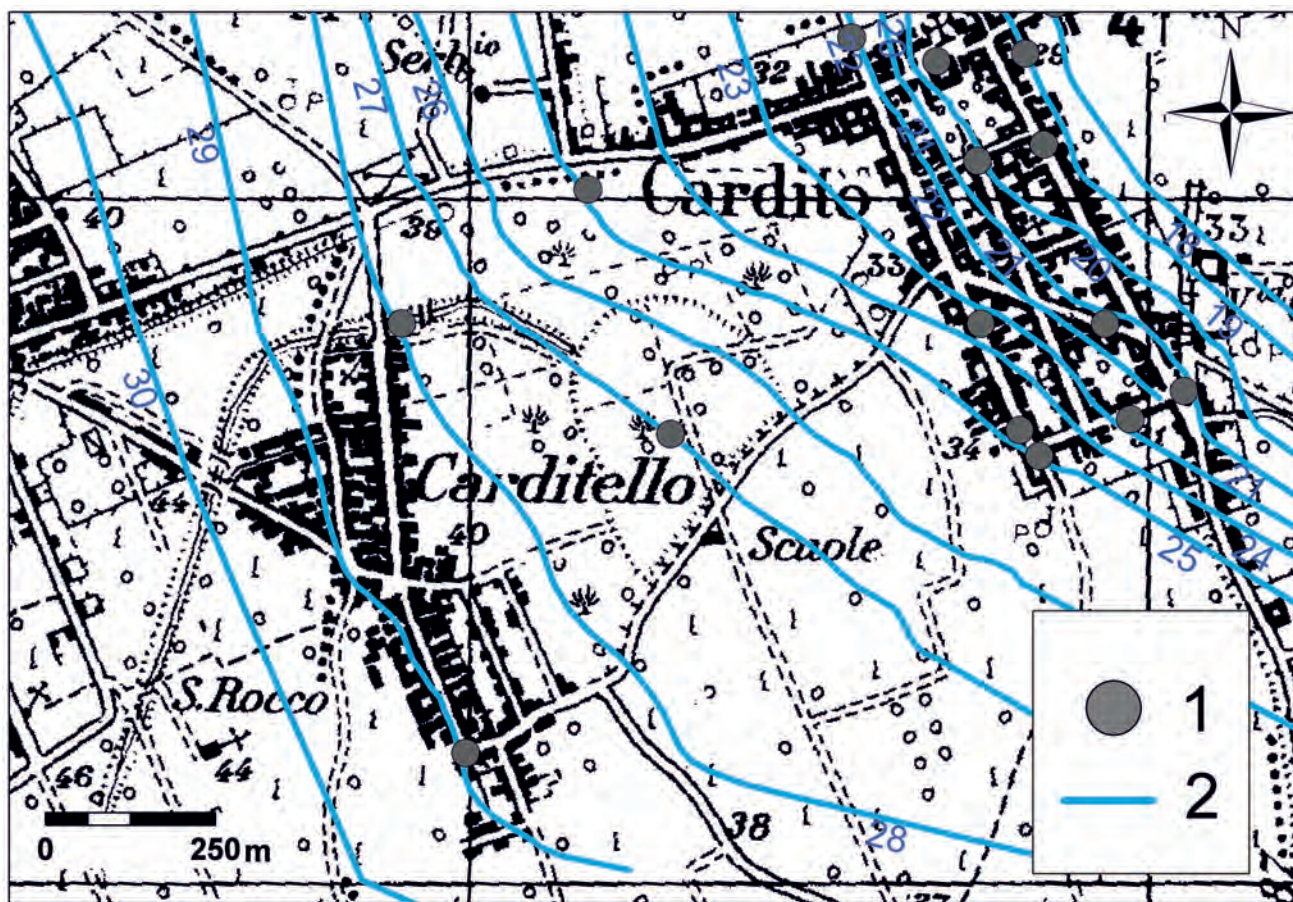


Fig. 8 - Carta del tetto della *facies* tufacea della formazione dell'Ignimbrite Campana nell'area di Cardito. Legenda: 1) sondaggio; 2) isolinee (m s.l.m.).
- Contour map of the top of Campanian Ignimbrite Tuff in the Cardito area. Legend: 1) borehole; 2) Contours (meters above sea level).

In questo settore del centro storico di Afragola, le cavità presenti nel sottosuolo sono numerose (fig. 10); due di esse (cavità n. 293 e 294) risultano essere prossime allo sprofondamento.

Le cavità hanno uno sviluppo allungato in direzione E-W; di entrambe esiste un rilievo con sezioni (fig. 11).

In questo caso sono state riconosciute le seguenti circostanze:

- 1 – presenza del *top* della *facies* tufacea dell'Ignimbrite Campana a 9 metri dal piano campagna;
- 2 – presenza di cavità al disotto del piano stradale;
- 3 – Assenza di eventi meteorici importanti.

Negli Annali idrologici a cura dell'ISTAT (anno 1993, parte I, sez. B) non sono riportate precipitazioni relativamente alle stazioni pluviometriche poste nelle vicinanze (Napoli Capodichino e S. Antimo).

È molto verosimile dunque, che sia stato il collasso del riempimento di una canna di accesso ad una cavità ad aver provocato lo sprofondamento in superficie, e che un ruolo determinante sia stato svolto dall'esiguo spessore della formazione tufacea a tetto della cavità, che in base alla ricostruzione stratigrafica si aggira intorno al metro (fig. 12).

3.3.1.3. - Grumo Nevano, 9 gennaio 2014

Il comune di Grumo Nevano confina con il comune di Frattaminore; per tale motivo si ritiene utile descrivere questo sprofondamento, in quanto le osservazioni effettuate nel corso del sopralluogo, pochi giorni dopo l'evento, sono sostanzialmente valide anche per l'area oggetto di studio.

Il *sinkhole* ha interessato il cortile di un edificio in abbandono in via Raffaele Chiacchio 25 (fig. 13), determinando la formazione di una voragine di forma irregolare, sub circolare, del diametro di 6 metri, profonda circa 15 metri.

Nel corso del sopralluogo si è potuto verificare l'esistenza alla base dello sprofondamento, di una cavità scavata nella formazione tufacea dell'IC (fig. 14), alla quale si accedeva verosimilmente attraverso almeno due canne di pozzo: una di esse era stata coinvolta nel crollo (fig. 15), la seconda era seminascosta dalla pavimentazione del cortile.

Non essendosi verificate nei giorni immediatamente precedenti lo sprofondamento: i) precipitazioni meteoriche intense; ii) perdite di condutture e sottoservizi; iii) lavori di manutenzione, è ipotizzabile che il crollo sia avvenuto a partire dal cedimento della

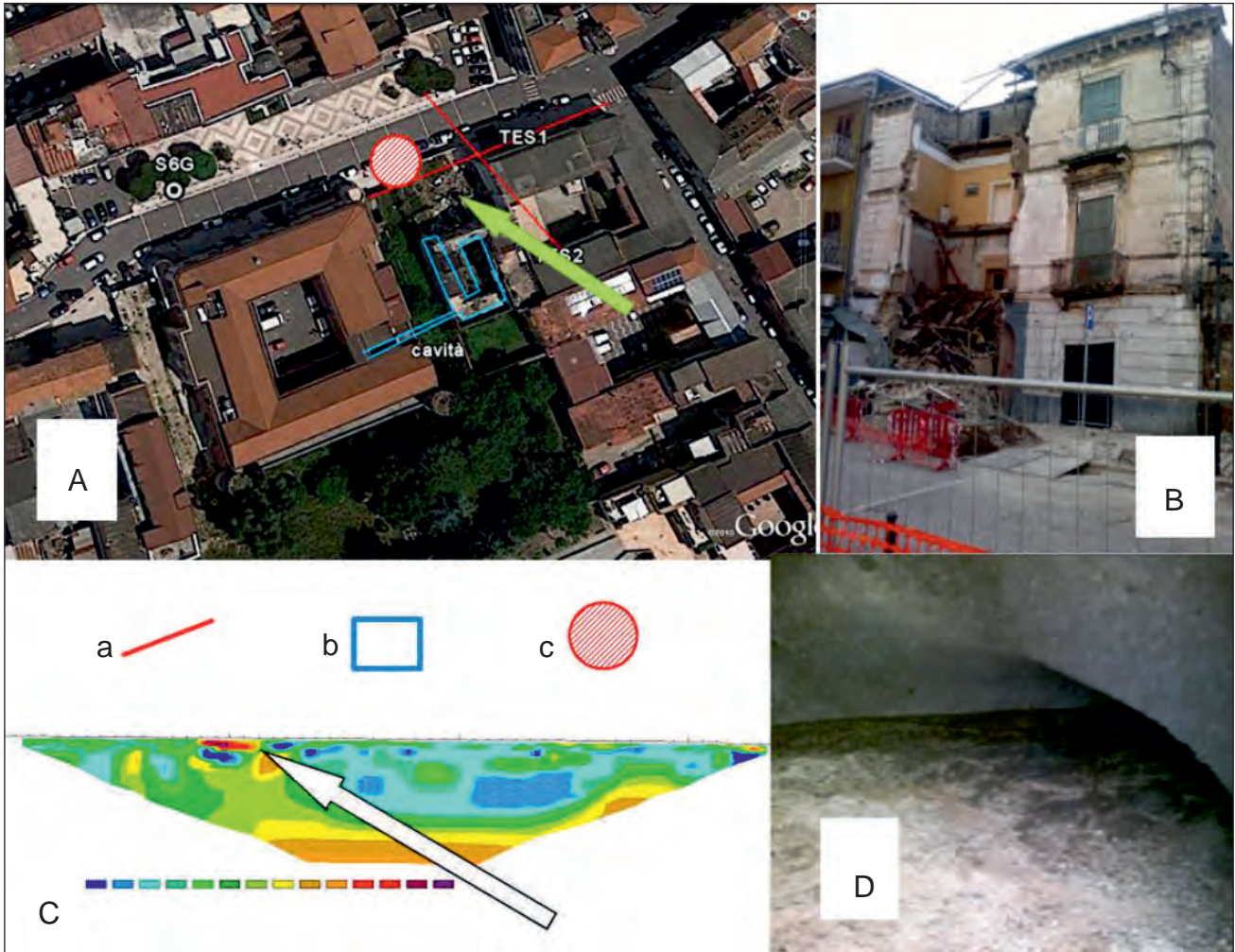


Fig. 9 – Il sinkhole del 6 gennaio 2012 a Cardito (NA): A) immagine da *Google Earth* ©. Legenda: a) traccia della tomografia elettrica; b) estensione della cavità; c) sinkhole. La freccia verde indica l'area occupata dall'edificio crollato. B) edificio crollato. C) profilo relativo alla tomografia elettrica ERT1. La freccia bianca indica l'area crollata. D) foto della cavità.

- The January 6th 2012 sinkhole at Cardito (NA): A) aerial view (from *Google Earth* ©). Legend: a) trace of ERT section; b) cavity inferred extension; c) sinkhole. The green arrow shows the occupied area of the building collapsed. B) collapsed building. C) ERT section TES1. White arrow indicates the collapsed area. D) cavity's detail.



Fig. 10 – Il centro storico di Afragola (NA). Legenda: 1) cavità sotterranee; 2) sinkhole censiti; 3) sinkhole del 16 ottobre 1993; 4) traccia della sezione geologica di figura 12.

- The Afragola (NA) historic centre. Legend: 1) cavities; 2) censused sinkholes; 3) the 16/10/1993 sinkhole; 4) geological section of figure 12.

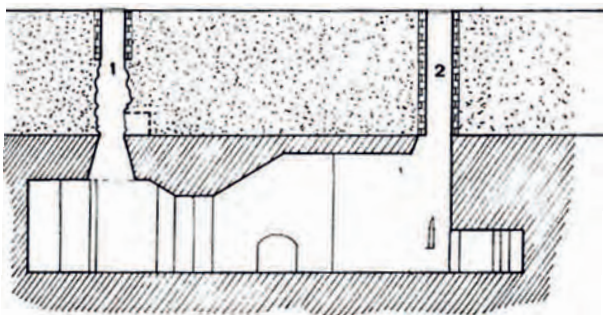


Fig. 11 – Sezione della cavità n. 294 (ubicazione in fig. 10)
- Section of cavity n. 294 (location in fig. 10).

canna di pozzo, per effetto dello scadimento delle caratteristiche geotecniche dei materiali di riempimento, coinvolgendo successivamente la volta della cavità.

È interessante notare che, l'edificio ubicato a pochi metri di distanza, sul lato opposto del marciapiede, è stato interessato anni orsono da un analogo episodio di sprofondamento, a seguito del quale era stata rilevata una cavità, precedentemente sconosciuta.

La cavità era stata riempita e l'edificio consolidato, ma nessun intervento di prevenzione sugli edifici limitrofi è stato messo in atto, e soltanto per una casualità non si sono verificate vittime o danni ulteriori.

4. - FATTORI PREDISPONENTI E SCATENANTI LA FORMAZIONE DI SINKHOLES

4.1. - FATTORI PREDISPONENTI

Nell'area di studio, il primo indiscusso fattore predisponente il verificarsi di sinkhole è la presenza ad una profondità relativamente modesta dal piano campagna (10 – 15 m), della formazione tufacea dell'IC, sede di una complessa rete di cavità sotterranee.

L'elaborazione dei dati acquisiti evidenzia un morfologia articolata del tetto della facies tufacea, soprattutto per effetto di fasi erosive successive alla sua messa in posto.

È interessante notare che gli antichi centri storici dei comuni di Casoria e Afragola sono stati edificati in corrispondenza di *alti relativi* del tetto della formazione tufacea, ovvero a profondità minore dal piano campagna, dove questa era più facilmente accessibile attraverso lo scavo sotterraneo (fig. 16).

Il secondo fattore predisponente è legato alla profondità ed alle dimensioni delle cavità: minore profondità del tetto della cavità rispetto al piano campagna così come la maggiore frequenza e ampiezza delle cavità possono favorire maggiormente l'innescò di un sinkhole.

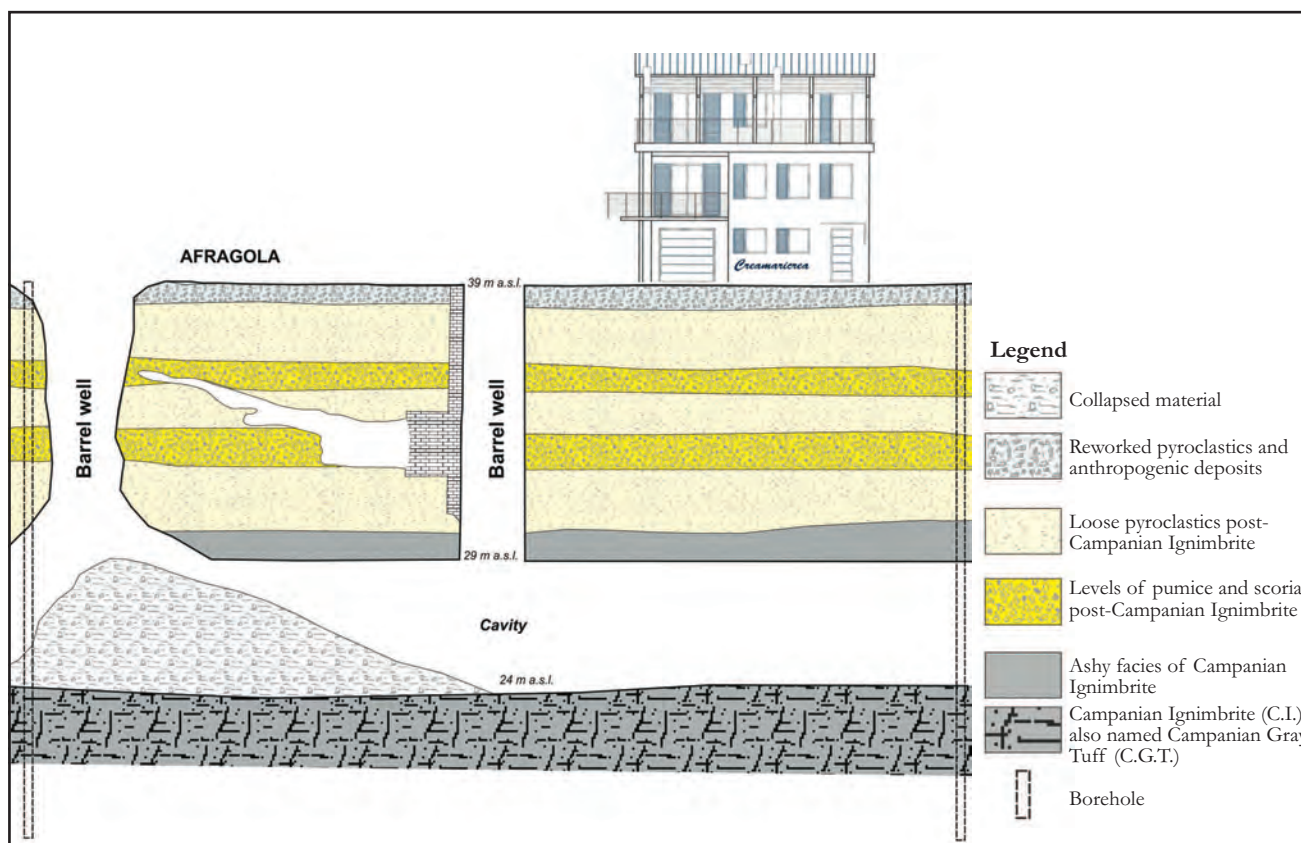


Fig. 12 – Sezione geologica interpretativa del sinkhole del 16 ottobre 1993 ad Afragola (ubicazione in fig. 10).
- Geological section of the October 16th 1993 sinkhole at Afragola (location in fig. 10).



Fig. 13 – Il sinkhole del 9 gennaio 2014 a Grumo Nevano (NA).
- the January 9th 2013 sinkhole at Grumo Nevano (NA).



Fig. 14 – Rinvenimento alla base dello sprofondamento del 9/1/2014 di una cavità non conosciuta.
- The discovery of a not known cavity underlying the January 9th 2014 sinkhole.

Tra i fattori predisponenti va inserita la presenza di accessi, attraverso pozzi verticali, alle cavità, noti come canne di pozzo o *occhi di monte* che venivano utilizzati anche come punti di ventilazione e di trasferimento del materiale verso la superficie. Questi pozzi rappresentano dei punti di maggiore debolezza della volta della cavità ed un serio pericolo soprattutto quando sono stati obliterati o ricoperti da



Fig. 15 – Canna di pozzo nascosta dalla pavimentazione, probabile innesco dello sprofondamento.
- Access well hidden by pavement, likely trigger of the collapse.

sottili strati di terreno, perché ricavati in terreni caratterizzati da alta porosità e da bassa resistenza a rottura e riempiti di materiale di risulta. È stato osservato che quasi sempre il crollo delle cavità sotterranee si è avuto proprio in corrispondenza di canne di pozzo abbandonate e prive di una qualsiasi opera di manutenzione (es.: Afragola, 16 ottobre 1993). Così come per le cavità, quindi, anche una maggiore frequenza ed ampiezza degli occhi di monte può favorire l'innesco di *sinkhole*.

Anche la presenza di sottoservizi idrici (fogne, acquedotti e loro intersezioni) rappresenta fattore predisponente in quanto molto spesso lungo di essi si assiste a sistematiche perdite che possono lentamente saturare i terreni a tetto della volta della cavità o creare fenomeni di soffusione sotterranea (es.: Cardito, 6 gennaio 2012)

Altro fattore importante è la presenza di strade in asse alle cavità dove, tra l'altro sono posizionate le condotte delle reti idriche (es.: Casalnuovo, 6 agosto 2012).

4.2. - CAUSE SCATENANTI

Tra le *cause scatenanti* sicuramente vanno inserite le intense piogge che attraverso il cattivo funzionamento dei recapiti fognari possono saturare i ter-

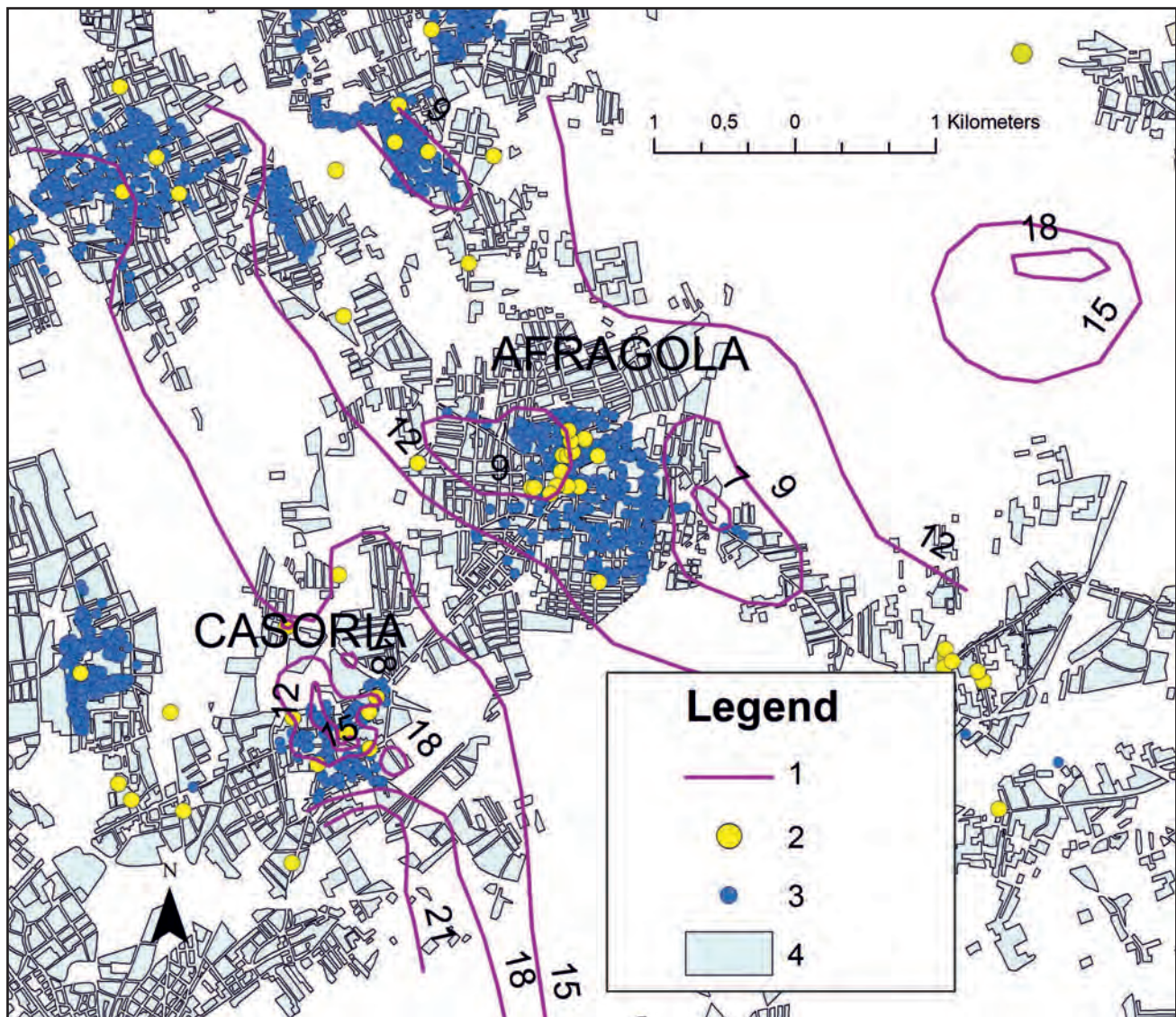


Fig. 16 – Carta del tetto della formazione tufacea dell'Ignimbrite Campana (39 ky bp). Legenda: 1) curve di eguale profondità dal piano campagna; 2) sinkholes; 3) cavità; 4) area urbanizzata.

- Campanian Ignimbrite Map (39 ky bp). Legend: 1) depth contours (m bgl); 2) sinkholes; 3) cavities; 4) urbanized area.

reni sabbioso-limosi in cui sono scavati i pozzi di accesso alla sottostante formazione tufacea.

Gli stessi effetti possono essere raggiunti in assenza di piogge attraverso le perdite delle condotte idriche in pressione o fognarie. In questo caso spesso si assiste ad un *effetto a catena*, nel senso che piccole perdite innescano piccole voragini che a loro volta, se mal sistemate possono indurre rotture maggiori della rete, perdite di maggiori entità e crolli improvvisi.

Le forti vibrazioni o scuotimenti del terreno possono essere un altro fattore scatenante. Si possono avere per passaggio sulle strade di mezzi pesanti oppure per lavori eseguiti in aree limitrofe, più raramente per eventi sismici naturali che in quest'area sono di ridotta magnitudo.

Un ultima causa scatenante evidenziatasi negli

ultimi anni è data dalle trasformazioni e dagli interventi di tipo urbanistico.

La vendita di un fabbricato o di un'area si accompagna spesso a un frazionamento dell'area con la conseguenza che il preesistente edificio viene ampliato (o un nuovo fabbricato viene realizzato) interessando un'area (tipicamente un cortile) nel cui sottosuolo si estende una cavità ormai dimenticata e in disuso.

In questi casi, la modifica alla condizione preesistente determina il collasso degli occhi di monte ormai dimenticati.

Da sottolineare comunque che tutte le cause di innesco sopra descritte svolgono un ruolo realmente efficace solo a causa delle condizioni di abbandono e di assenza di manutenzione degli accessi e della rete di cavità sotterranee.

5. - CONCLUSIONI

L'area metropolitana di Napoli è un tipico esempio di area densamente urbanizzata ad elevato rischio *sinkhole*.

L'incidenza dei fattori predisponenti ed innescanti i fenomeni di sprofondamento improvviso va inquadrata in una cornice ambientale, in cui il sistema soprasuolo-sottosuolo comprendente l'urbanizzato (edifici, strade ecc.), i sottoservizi connessi e il sottosuolo (terreni, cavità e altre opere in sottosuolo) costituisce un *sistema complesso*, in continua trasformazione.

Tale sistema ha subito una rapida e radicale evoluzione nel corso dell'ultimo cinquantennio, per cui quasi l'intera superficie risulta edificata ed allo stesso tempo si è avuta la progressiva perdita della memoria storica dell'esistenza di una rete caveale sotterranea.

La ricerca svolta ha svolto permesso di individuare all'interno dell'area di studio, apparentemente omogenea, i settori maggiormente suscettibili a *sinkhole*, in relazione alle caratteristiche stratigrafiche del sottosuolo e soprattutto alla presenza e profondità di uno strato di tufo lapideo utilizzato sin dall'antichità per attività estrattive. Laddove il tufo è più superficiale si rileva una maggiore concentrazione di cavità, ed allo stesso tempo, di *sinkhole*.

Il censimento delle cavità ha evidenziato che esse sono presenti con maggiore numero soprattutto nei centri storici degli abitati. Purtroppo però, solo per alcune di esse si dispone di un preciso rilievo topografico. Questo vale anche per i numerosi pozzi di accesso, che sono conosciuti solo in parte in quanto i loro ingressi sono stati ormai obliterati.

Per quanto riguarda la genesi dei *sinkhole*, è stato accertato che essi si generano per saturazione, e relativo appesantimento dei terreni piroclastici sciolti (sabbie e limi sabbiosi) che poggiano sovraccaricando le volte in tufo di cavità sotterrane. Talora per la presenza di terreni di riporto utilizzati per il riempimento delle canne di accesso alle cavità.

La saturazione può avvenire durante periodi di intense piogge per mal funzionamento della rete fognaria o per infiltrazioni nel sottosuolo. In altri casi invece i *sinkhole* si generano anche in assenza di piogge per perdite continue e prolungate di condotte idriche in pressione.

In altri casi ancora, le perdite da reti fognarie o idriche creano effetti prolungati nel tempo di suffusione degli strati sabbiosi che vengono erosi e depositati nei sottostanti ambienti ipogei.

È stato osservato che anche lavori di riparazione mal eseguiti di piccole buche e depressioni nel manto stradale ed il traffico veicolare, possono

favorire rotture progressive di condotte idriche in profondità ed essere, successivamente, causa di *sinkhole*.

Per poter ridurre la suscettibilità da *sinkhole* in ambito comunale sono necessari studi ed indagini mirate. In primo luogo è importante una ricerca storica e bibliografica finalizzata a recuperare informazioni di *sinkhole* storici ed alla presenza di cavità sotterrane. Le cavità dovranno essere rilevate e definite le condizioni di stabilità delle loro volte tenendo conto dello stato di fratturazione del tufo, dei terreni e delle strutture ed infrastrutture che le ricoprono.

Nei casi in cui non è possibile accedere nelle cavità è necessario prevedere degli approfondimenti finalizzati al riconoscimento di vuoti sotterranei come indagini geofisiche da tarate successivamente con perforazioni.

Per le situazioni più critiche e maggior rischio sarà opportuno prevedere una campagna di monitoraggio da affidare a tecnici specializzati.

Questo studio ha inteso fornire un contributo alla elaborazione di un iter operativo per la definizione da una scala di dettaglio, del singolo comune, della suscettibilità a fenomeni di sprofondamento improvviso, e per la mitigazione del rischio da *sinkhole* in aree urbanizzate.

BIBLIOGRAFIA

- ALBERTINI V., BALDI A., BARTOLI L., COLLINI F., ESPOSITO C., GUERRA V., MIRAGLINO P., SCHIATTARELLA F. & VALLARIO A. (1988) - *Le cavità sotterrane del napoletano: pericolosità e possibili utilizzazioni*. Geol. Tec., **3**: pp. 54-63.
- AVERSA M. & D'ANIELLO V. (2010) - *Informazioni storiche e fenomeni di sprofondamento nel comprensorio dell'antica città volca di Velletri (RM)*. Atti del 2° Workshop Internazionale "I *sinkholes*. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", pp. 75-84, Roma.
- AVERSA S., EVANGELISTA A. & SCOTTO DI SANTOLO A. (2013) - *Influence of the subsoil on the urban development of Napoli*. Proc. Of the 2nd Int. Symp. On Geotechnical Engineering for the preservation of Monuments and Historic Sites, pp. 15-43.
- BARBERI F., INNOCENTI F., LIRER L., MUNNO R., PESCATORE T. & SANTACROCE R. (1978). *The Campanian Ignimbrite: a major prehistoric eruption in the Neapolitan area (Italy)*. Bull. Volcanol., **41** (1): pp. 1-22.
- BASSO N., CIOTOLI G., FINOIA M.G., GUARINO P.M., MIRAGLINO P. & NISIO S. (2013) - *Suscettibilità a fenomeni di sinkholes antropogenici nel territorio di Napoli*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **93**, pp. 73-104.
- BELLUCCI F. (1994). *Nuove conoscenze stratigrafiche sui depositi vulcanici del sottosuolo del settore meridionale della Piana Campana*. Boll. Soc. Geol. It., **113**: pp. 395-420.
- CANTILE A. (1991) - *Le cave nascoste del comprensorio aversano*. L'Universo, **71**, ISSN: 0042-0409.
- CAREDDA P., MARIOLU E. & NISIO S. (2010) - *I sinkholes in Sardegna meridionale. Alcuni esempi dal Sulcis inglesiente e possibili correlazioni con le attività antropiche*. Atti del 2° Workshop Internazionale: "I *sinkholes*. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", pp.

- 231 – 242, Roma.
- CATENACCI V. (1992) – *Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **47**: pp. 301, Roma.
- CIOTOLI G., CORAZZA A., FINOIA M.G., NISIO S., SERAFINI R. & SUCCHIARELLI C. (2013) – *I Sinkholes antropogenici nel territorio di Roma Capitale*. In: *I Sinkholes: metodologie di indagine, ricerca storica, sistemi di monitoraggio e tecniche di intervento. Centri abitati e processi di instabilità naturale: valutazione, controllo e mitigazione*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **93**: 143-181.
- CIVETTA L., ORSI G., PAPPALARDO L., FISHER R.V., HEIKEN G. & ORT M. (1997) – *Geochemical zoning, mingling, eruptive dynamics and depositional processes – The Campanian Ignimbrite, Campi Flegrei caldera, Italy*. J. Volcanol. Geotherm. Res, **75**: pp. 183-219.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (2014) – *Progetto AVI*. AVI Project <http://avi.gndci.cnr.it/>>
- CORAZZA A. (2004) – *Il rischio di fenomeni di sprofondamento in Italia: le attività del Dipartimento della Protezione Civile*. Atti 1° Seminario: “Stato dell’arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio”, Roma, 20-21 Maggio 2004: 319-330.
- CORAZZA A. (2010) – *Individuazione di movimenti precursori di sprofondamenti nell’area urbana di Roma attraverso l’utilizzo dell’interferometria differenziale*. Atti 2° Workshop internazionale: “I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato”, Roma 3-4 dicembre 2009, ISPRA: 685-702.
- DE VIVO B., ROLANDI G. & GANS P.B. (2001) – *New constraints on the pyroclastic eruptive history of the Campanian volcanic Plain (Italy)*. In: *Mt. Somma Vesuvius and Volcanism of the Campania Plain*, B. DE VIVO & G. ROLANDI, (Eds.), *Spec. Issue Mineral. Petrol.*, **73**: pp. 47- 65.
- DE VIVO B. (2006) – *Volcanism in the Campania Plain. Vesuvius, Campi Flegrei and Ignimbrites*. Elsevier, *Developments in Volcanology*, **9**: pp. 324.
- DI MAGGIO C., DI TRAPANI F.P., MAFONIA G., SALVO D. & VATTANO M. (2010) – *Primo contributo sui sinkhole nelle evaporiti della Sicilia (Italia)*. Atti del 2° Workshop Internazionale: “I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato”: pp. 299-314, Roma.
- GUARINO P.M. & NISIO S. (2012) – *Anthropogenic sinkholes in the territory of the city of Naples (Southern Italy)*. J. Phys. Chem. Earth, **49**: pp. 92-102.
- ISTAT (2011) – *Censimento della popolazione del 2011*. <http://censimentopopolazione.istat.it/>
- LOLLINO P. & PARISE M. (2010) – *Analisi numerica di processi di instabilità di cavità sotterranee e degli effetti indotti in superficie*. Atti del 2° Workshop Internazionale: “I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato”: pp. 803-816, Roma.
- LOLLINO P., MARTIMUCCI V. & PARISE M. (2013) – *Geological survey and numerical modeling of the potential failure mechanisms of underground caves*. Geosystem Engineering, **16** (1). pp. 100-112.
- MAY A., CARSANA M., CASTELLANZA R., SPADA M., ORLANDI G.M. BIANCHI S. & BERTOLINI M. (2010) – *Rischi di crollo catastrofico di cavità antropiche: le ex gallerie minerarie di gesso allagate di Santa Brigida (BG). Studi, modellazioni ed opere pilota di consolidamento*. Atti del 2° Workshop Internazionale: “I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato”: pp. 817-844, Roma.
- NISIO S. (2010) – *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani*. Atti 2° Workshop internazionale: “I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell’ambiente naturale ed in quello antropizzato”. Roma, 3-4 dicembre 2009, ISPRA: 845-864.
- PARISE M., VENNARI C., GUZZETTI F., MARCHESINI I. & SALVATI P. (2013) – *Preliminary outcomes from a catalogue of natural and anthropogenic sinkholes in Italy, and analysis of the related damage*. Ren. Online Soc. Geol. It., **24**: pp. 225-227.
- PROVINCIA DI NAPOLI (2002) – *Censimento delle cavità sotterranee dei comuni della Provincia di Napoli*. Direzione PTCP – SIT-Piani di settore, Napoli.
- PUTIGNANO M.L., RUBERTI D., TESCIONE M. & VIGLIOTTI M. (2007) – *Evoluzione tardo quaternaria del margine casertano della Piana Campana (Italia meridionale)*. Ital. J. Geosci., **126**, (1): pp. 11-24.
- ROMANO P., SANTO A. & VOLTAGGIO M. (1994) – *L’evoluzione geomorfologica del F. Volturno (Campania) durante il tardo Quaternario (Pleistocene medio superiore - Olocene)*. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences, **7**, (1): pp. 41-56.
- SANTANGELO N., CIAMPO G., DI DONATO V., ESPOSITO P., PETROSINO P., ROMANO P., RUSSO ERMOLLI E., SANTO A., TOSCANO F. & VILLA I. (2010) – *Late Quaternary buried lagoons in the northern Campania plain (southern Italy): evolution of a coastal system under the influence of volcanotectonics and eustatism*. Ital. J. Geosci., **129**, (1).
- SCOTTO DI SANTOLO A., EVANGELISTA A. & EVANGELISTA L. (2013) – *The Fontanelle Cemetery: between legend and reality*. National Research Council – AVI Project [<http://avi.gndci.cnr.it/>](http://avi.gndci.cnr.it/)