

Suscettibilità ai fenomeni di sinkholes antropogenici nel territorio di Napoli

Susceptibility to anthropogenic sinkholes in the Naples district

BASSO N. (*), CIOTOLI G. (**), FINOIA M.G. (***), GUARINO P.M. (***),
MIRAGLINO P. (*), NISIO S. (***)

RIASSUNTO - Il territorio del comune di Napoli è una delle aree fortemente urbanizzate d'Italia maggiormente interessate da fenomeni di sprofondamento improvviso, la cui interazione con l'edificato è, ed è stata nel passato, causa frequente di danni agli edifici, alle infrastrutture, al patrimonio culturale e di perdita di vite umane.

Lo scopo principale dello studio è stato quello di pervenire ad una zonazione del territorio del comune di Napoli in termini di suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento improvviso (sinkholes antropogenici).

Nel corso dello studio si è proceduto, in primo luogo, alla ricerca di ulteriori dati e informazioni finalizzata all'aggiornamento del database dei sinkholes. Più di 200 sinkholes di origine antropica sono ad oggi conosciuti nel territorio del comune di Napoli, relativamente all'intervallo di tempo compreso tra il 1915 e il 2012.

Attraverso l'analisi dei dati, strutturati in ambiente GIS, e attraverso lo studio dei casi di maggiore interesse, è stato approfondito lo studio dei meccanismi genetici, che appaiono legati alla esistenza di due fattori predisponenti fortemente interagenti tra di loro: l'esistenza di una complessa rete caveale e l'inadeguatezza del sistema di smaltimento delle acque fognarie e meteoriche. È stata, inoltre, analizzata l'influenza legata ad altri fattori, quali l'assetto morfologico in superficie, la profondità della formazione tufacea dal piano campagna e la profondità della falda.

Le precipitazioni meteoriche e, in misura minore, l'azione antropica, svolgono il ruolo di fattore di innesco.

I dati e le informazioni relative ai fattori predisponenti individuati (orografia, litologia, profondità del substrato tufaceo, profondità della falda, rete delle cavità e rete fognaria) sono stati elaborati mediante le tecniche di statistica spaziale e multivariata al fine di valutare l'interdipendenza e i possibili legami tra essi.

L'elaborazione della mappa di suscettibilità si è sviluppata mediante due diversi livelli di modellazione: i) il primo livello fornisce il potenziale di un territorio al verificarsi del sinkhole su larga scala; ii) il secondo livello crea un modello probabilistico che a parità di fattori predisponenti può essere estrapolato per aree simili.

PAROLE CHIAVE: Napoli, anthropogenic sinkholes, voragini, cavità sotterranee, suscettibilità

ABSTRACT - The Naples territory is the most urbanized area of Italy and it is one of the Italian areas more interested by anthropogenic sinkholes.

Sinkholes interaction with urban area have causes damage to buildings and infrastructures with loss of lives.

The old sinkholes census and database are not complete and they are based on very limited researches.

The purpose of this study is the increase of the researches, the study of the causes of the sinkholes, the realization of a new complete anthropogenic sinkholes database and the study of the sinkhole susceptibility.

(*) Comune di Napoli; (**) CNR-IGAG, Roma; (***) ISPRA, Roma

The genesis of the sinkhole is due to two major factors often strongly interacting with each other: the existence of a complex network of underground cavities and the inadequacy of the sewage system.

Rainfall has been identified as the main triggering factor, and, to a lesser extent, anthropogenic action.

Over the last decades an increase in the occurrence of the sinkholes in Naples determines risk conditions to citizenship and disruption of roads, houses, churches and underground networks. Furthermore, the aspects related to the preservation of cultural heritage and of underground sites of historical and archaeological importance should be considered.

A methodology has been proposed to individuate the sinkholes susceptibility of the Naples district.

The sinkhole susceptibility study is conducted which a sinkhole could occur in a certain area in an infinite time interval and a certain area has characteristics that facilitate a sinkhole.

In this way sinkhole susceptibility maps can be produced identifying the areas with characteristics prone to the phenomenon. This could be obtained through three different levels of modeling: i) the first-level provides the potential of an area to the collapse occurrence at large scale; ii) the second-level creates a probabilistic model that can be extrapolated to similar areas; iii) the third-level tries to evaluate the space-time evolution of the phenomenon at site specific.

More than 200 anthropogenic sinkholes have been recognized in the territory of the Naples; they are occurred between 1915 and 2012.

It includes the construction of a probabilistic model based on the evaluation of the statistical relationships between the known collapses and a group of conditioning factors (i.e., presence of anthropogenic cavities, geological setting, adequate hydrological conditions, sediments prone to subsidence) by using Logistic Regression (LR) (DOCTOR *et alii*, 2008).

KEY WORDS: Naples, anthropogenic sinkholes, collapses, caves, susceptibility.

1. - INTRODUZIONE

Il territorio del comune di Napoli è una delle aree urbanizzate italiane maggiormente interessate da fenomeni di sprofondamento improvviso.

Si tratta di fenomeni di origine antropica che coinvolgono terreni di natura vulcanoclastica (tufi e piroclastiti incoerenti), la cui formazione è legata alla presenza di una diffusa rete di cavità sotterranee e di una rete insufficiente di smaltimento delle acque fognarie e meteoriche.

L'interazione dei sinkholes con un tessuto urbano molto fitto è all'origine di gravi danni sull'edificato e di perdita di vite umane.

La formazione di voragini avvenute sul territorio italiano viene descritta negli Atti della Commissione di Studio sul Sottosuolo di Napoli (AA.VV., 1967) e, successivamente, in CATENACCI (1992), RASULO (2000) e nel Progetto AVI del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).

Un primo censimento mirato degli sprofondamenti è stato realizzato dal Dipartimento della Protezione Civile Italiana (CORAZZA, 2004); tuttavia, esso non appare completo e copre un intervallo di tempo che va dalla fine degli anni '60 agli inizi del 2000.

Lo scopo del presente studio è stato quello di fornire un quadro il più possibile completo delle conoscenze del fenomeno. Le attività di censimento e raccolta dati hanno permesso di costruire un database di oltre 200 segnalazioni e di analizzare i principali fattori predisponenti.

L'analisi dei fattori predisponenti e dell'influenza su di essi svolta dall'assetto geologico dell'area ha consentito di effettuare un primo studio di suscettibilità del territorio.

2. - ASSETTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO DEL TERRITORIO DI NAPOLI

Il territorio del comune di Napoli ricade nel settore centrale della depressione tettonica della Piana Campana. L'assetto geologico risulta fortemente condizionato dalla storia eruttiva dell'edificio vulcanico del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei, ubicati rispettivamente ad ovest e ad est, e dalla interazione con i processi sedimentari continentali e marini.

In larga parte dell'area di studio, il sottosuolo è costituito da terreni vulcanici (fig. 1), di età compresa tra il Pleistocene superiore e l'Olocene, in cui si riconoscono la formazione del *Tufo Giallo Napoletano Auct.* (12 ky b.p.) e la formazione dell'*Ignimbrite Campana Auct.* (37 ky b.p.), importanti livelli-guida dell'attività vulcanica dei Campi Flegrei (ORSI G. *et alii*, 1996).

Depositi piroclastici incoerenti relativi alla attività successiva al *Tufo Giallo Napoletano Auct.* chiudono verso l'alto la serie stratigrafica. Essi comprendono, nel settore più occidentale, potenti spessori di depositi da flusso piroclastico e da surge, mentre

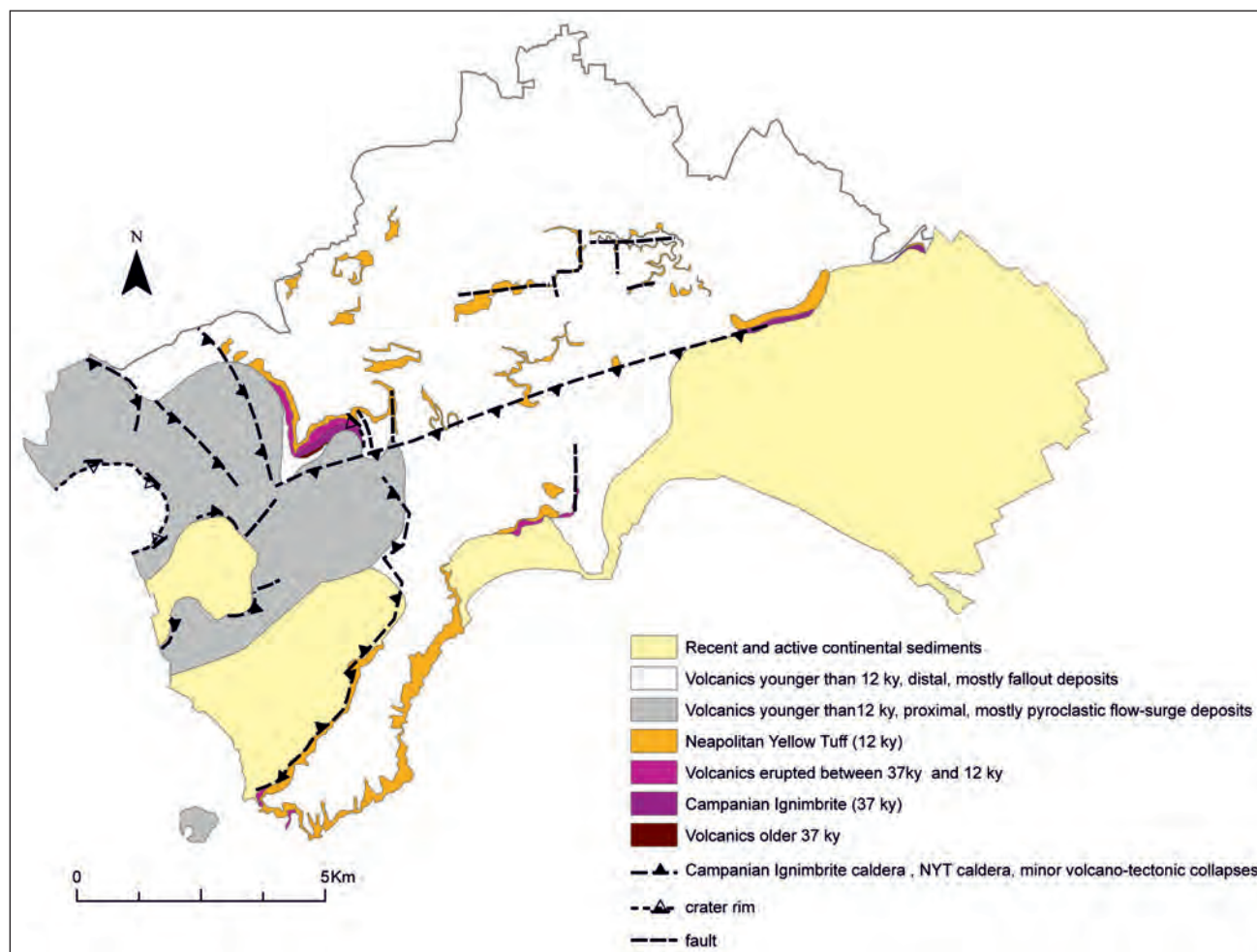


Fig. 1 – Schema geologico del comune di Napoli (da ORSI G. *et alii*, 1998 modificato).
 – *Geologic scheme of the Napolis area (from ORSI G. et alii, 1998 modified).*

ad ovest dell'allineamento Posillipo-Camaldoli sono costituiti da prodotti distali di caduta, dati da alternanze di livelli di cineriti e pomici.

Ad eccezione di limitati affioramenti tufacci presenti lungo le aree di versante e delle aree di piana, dove affiorano i depositi alluvionali, le piroclastiti incoerenti prevalgono di gran lunga all'affioramento, presentandosi sia in giacitura primaria che con grado di rimaneggiamento variabile.

Riperti, depositi di origine antropica e accumuli di sedimenti alluvionali di età storica si rinvencono localmente, anche con spessori rilevanti, nell'area urbana.

L'attività vulcanica flegrea ha esercitato un forte controllo anche sulla costruzione dell'assetto morfologico dell'area di Napoli. I fenomeni di collasso vulcano-tettonico responsabili della formazione della caldera dell'Ignimbrite Campana, della caldera

del Tufo Giallo Napoletano e di alcune depressioni minori, hanno determinato l'individuazione di gran parte dei rilievi collinari presenti nell'area di studio.

Fa eccezione la zona orientale dell'area di studio, dove si estende la piana alluvionale del fiume Sebeto, impostata nella depressione tettonica di Volla (BELLUCCI *et alii*, 1993). Il sottosuolo della piana del fiume Sebeto è costituito da sedimenti alluvionali e palustri progradanti nel settore costiero, sui più antichi sedimenti marini.

L'assetto morfologico articolato, l'elevata energia di rilievo delle aree di versante, le caratteristiche geotecniche dei terreni affioranti nonché le alterazioni del territorio connesse allo sviluppo urbano sono causa di una dinamica morfologica molto attiva e di frequenti fenomeni di dissesto, comprendenti frane delle coperture piroclastiche incoerenti, crolli dalle scarpate in tufo, sprofondamenti in superficie.

3. - LA RETE CAVEALE

Nel sottosuolo del territorio di Napoli esiste una complessa ed estesa rete caveale, scavata nel corso degli oltre 2000 anni di storia della città.

Si tratta di cunicoli e camere di forma e dimensioni molto diverse, realizzati per scopi differenti, sovente su livelli sovrapposti e frequentemente modificati da un successivo riutilizzo.

Nei quartieri maggiormente interessati dalla presenza di cavità sotterranee, il rapporto *superficie del suolo/estensione delle cavità* è di circa 70/1 (70 metri quadrati di superficie esterna per metro quadrato di cavità sotterranea), che si riduce ulteriormente in alcune zone, come il quartiere Stella, dove diventa 15 metri quadrati di superficie esterna per metro quadro di cavità sotterranea (ALBERTINI *et alii*, 1988).

La gestione di queste cavità, che interessano il sottosuolo napoletano per milioni di metri cubi, ha determinato negli anni molteplici problemi connessi alla loro stabilità, alla stabilità del piano campagna e degli edifici sovrastanti, all'incuria dei cittadini che spesso hanno individuato questi vuoti come sversatoi di immondizie e discariche di materiali di risulta provenienti dalle ristrutturazioni dei loro appartamenti, e in qualche caso come recapito finale dei loro impianti fognari inefficienti.

Il Servizio Sicurezza Geologica e Sottosuolo del Comune di Napoli cura da anni un database delle cavità censite, che, ad oggi, comprende oltre 900 cavità, per una superficie complessiva di oltre 60 ha; ma si stima un numero molto elevato di cavità e di pozzi di cui non sono note ubicazione e estensione (LOMBARDI *et alii*, 2010).

L'esplorazione sistematica delle cavità ebbe inizio verso la fine degli anni '60, ad opera del Centro Speleologico Meridionale (ESPOSITO, 2009; GIULIVO *et alii*, 2005) ed è continuata nel corso degli anni, con alcune accelerazioni relative al periodo delle verifiche statiche effettuate dopo il terremoto del 1980, alle attività realizzate dal Commissariato Straordinario per l'Emergenza del Sottosuolo agli inizi del 2000 e alle attività della Federazione Speleologica Campana.

A causa della complessità dei rapporti che legano frequentemente lo scavo iniziale di una cavità e il successivo ampliamento e riutilizzo, risulta più

agevole sintetizzare cronologicamente la "storia" dello sfruttamento del sottosuolo, affrontando, separatamente, i diversi usi principali che si sono avuti nei secoli: 1) aree funerarie e ipogei; b) cave; c) acquedotti; d) collegamenti e altro.

3.1 - AREE FUNERARIE E IPOGEI

Lo scavo di ambienti in roccia nel sottosuolo per uso funerario è un fenomeno che si diffonde a Napoli a partire almeno dall'età ellenistica (GRECO PONTELANDOLFO, 1985; VECCHIO, 1985).

Gli ipogei funerari greci costituivano unità sepolcrali individuali o familiari, che venivano scavate nella formazione tufacea affiorante nelle aree prossime alla cinta muraria settentrionale e lungo i fianchi delle ripide incisioni che solcavano le colline a nord di *Neapolis*, nel rispetto della consuetudine che voleva la città dei morti separata da quella dei vivi. Le fronti degli ipogei modellavano senza soluzione di continuità lo sviluppo delle pareti tufacee (COLUSSI & LEGGIERI, 2008).

Nascoste alla vista e sepolte dalle alluvioni torrentizie, la loro esistenza non è mai stata del tutto dimenticata. Sovente le tombe venivano scoperte e depredate durante la costruzione delle cisterne sotterranee degli antichi palazzi nobiliari; alcune descrizioni di tombe ancora contenenti i corredi funerari sono riportate in CELANO, 1776; GALANTE, 1895; GIUSTINIANI, 1816; RUGGIERO, 1888; DE PETRA, 1898, ma l'interesse della cittadinanza è riemerso a partire dagli inizi degli anni '80 con i rinvenimenti legati ai rilievi del sottosuolo successivi al terremoto del novembre 1980 (ESPOSITO, 2009).

Alcuni degli ipogei greci, come quelli di via dei Cristallini, custodiscono ancora bassorilievi scolpiti nel tufo e in marmo, tavolette in terracotta con scene di commiato, urne cinerarie e affreschi, conservando ancora un grande valore dal punto di vista artistico-culturale (fig. 2).

Altri ipogei, come quelli di vico Traetta, via S. Maria Anteseccula, via Settembrini sono stati, almeno in parte, oggetto di riutilizzo e di scempio con l'ampliamento e la distruzione per il prelievo di tufo. Un'altra area cimiteriale, già segnalata in RUGGIERO, 1888, è stata riportata alla luce durante alcuni lavori



Fig. 2 – Particolare dell'ipogeo greco di via dei Cristallini 133 (foto: C. Leggieri).
 – Detail of the Greek Hypogeum in 133 Cristallini Street (photo: C. Leggieri).

presso la sede del Museo Archeologico Nazionale nel 2007, e numerosi sono gli ipogei e le tombe rinvenute tra l'attuale via Foria e Capodimonte.

L'utilizzo del sottosuolo per uso funerario è continuato in età romana, con la realizzazione di ipogei gentilizi, in alcuni casi modificando e riadattando ipogei greci preesistenti, come nel caso dell'ipogeo di via dei Cristallini.

Il fatto nuovo, relativamente all'uso del sottosuolo a scopo funerario, è lo sviluppo delle catacombe cristiane, che a partire dagli inizi del III secolo è proseguito nel corso della tarda antichità fino al Medioevo.

Le catacombe cristiane, infatti, furono caratterizzate dall'aver due diverse funzioni: non solo come area cimiteriale e sepolcreto, ma anche come luogo di culto destinato alla liturgia (EBANISTA & AMODIO, 2008), per il fatto che si svilupparono in aree già destinate a uso funerario ove erano presenti tombe di santi o martiri che costituivano il

fulcro attorno al quale si sviluppavano le gallerie.

Tra le catacombe cristiane, le catacombe di S. Gennaro costituiscono il complesso più imponente (fig. 3). Il nucleo originario si sviluppò attorno a una tomba gentilizia romana del II sec. d.C., accogliendo nel III sec. d.C. i resti mortali di S. Agrippino.

Divennero luogo di venerazione dopo che nel 420 circa vennero traslate le spoglie di S. Gennaro, successivamente trafugate dal principe longobardo Sicone I nel 831. Vennero utilizzate massicciamente fino alla fine del IX secolo, quando ebbero inizio il decadimento e l'abbandono (FASOLA, 1975).

Al contrario, è difficile datare le fasi più antiche e ricostruire l'impianto planimetrico delle altre catacombe cristiane di S. Gaudioso, di S. Severo e di S. Efebo (AMODIO, 2000).

Molto più vicino ai giorni nostri è stato l'utilizzo del cimitero delle Fontanelle, nel rione Sanità (fig. 4).



Fig. 3 – Catacombe di S. Gennaro: particolare (foto: P.M. Guarino).
– *St. Iannarius Catacombs: detail (photo: P.M. Guarino).*



Fig. 4 – Cimitero delle Fontanelle (foto: Comune di Napoli).
– *Fontanelle cemetery: detail (photo: Naples Municipality).*

Si tratta di un ossario, all'interno di una antica cava, estesa per circa 3000 m² e del volume di circa 30.000 m³, nel rione Sanità, in cui l'usanza di trasportarvi i defunti ebbe inizio con la peste del 1656 (che provocò a Napoli circa 300.000 morti) e perdurò fino al colera del 1836, accogliendo anche le spoglie delle persone povere e di quelle provenienti dalle "terre sante" delle chiese.

3.2. - LE CAVE

Sin dall'antichità, si è sviluppata nell'area napoletana una intensa attività estrattiva in sotterraneo, finalizzata alla escavazione di materiali di origine vulcanica, a comportamento lapideo (tufo e piperno) o sciolti (pomice); l'estrazione della pozzolana è invece sempre stata praticata in cave a cielo aperto.

Per quanto riguarda l'escavazione di materiale lapideo, fino al Medioevo è prevalso l'utilizzo del tufo; l'utilizzo del piperno, di cui si ha traccia già in alcune antiche tombe greche, si è diffuso soltanto a partire dal secolo XV.

Le cave di tufo più antiche ad oggi note sono quelle poste al piede della collina di Capodichino, in prossimità del cimitero di S. Maria del Pianto, in tufo grigio appartenente alla formazione dell'Ignimbrite Campana, da cui sono stati prelevati i grossi blocchi utilizzati per l'edificazione della cinta muraria greca, i cui resti sono ancora oggi visibili in più punti della città (fig. 5).



Fig. 5 – Resti delle antiche mura greche (foto: P.M. Guarino).
– *Remnants of ancient Greek wall (photo: P.M. Guarino).*

Probabilmente, in età greca cominciò lo scavo di ipogei e lo sfruttamento delle cave nella formazione del Tufo Giallo Napoletano al piede della collina di Pizzofalcone, tanto da giustificare il toponimo di quell'area di "regione megarense" (da "τὰ μεγάρα" in greco = abitazioni sotterranee).

Anche lo storico Pontano dà notizia di grotte di età greco-romana scavate nel tufo, le cosiddette grotte Platamonie, presenti nella zona di S. Lucia, nascoste dai fabbricati del Chiatamone, ove ancora oggi ricorre il toponimo di Vico Grotta a S. Lucia.

L'apertura e l'ampliamento di cave di tufo giallo ha interessato per molti secoli la base dei versanti dei rilievi collinari di Pizzofalcone, Vomero e Capodimonte che circondano l'area del primitivo insediamento greco-romano, sostanzialmente immutata nella sua estensione fino alla fine del periodo ducale, come riportato nella Pianta di Napoli del secolo XI di Bartolomeo Capasso e che si ampliò relativamente poco in età angioina.

Durante il periodo del vicereame aragonese, il rifacimento delle mura della città, la sistemazione delle principali vie, la creazione dei quartieri spagnoli e soprattutto l'imponente sviluppo demografico condussero a uno sfruttamento estremamente invasivo delle cave, al punto che prima un bando del viceré Conte di Miranda del 20 maggio 1588 e poi un editto del conte Di Lamos del 9 ottobre 1615, vietarono qualsiasi tipo di escavazione lungo le pendici della collina del Vomero (AA.VV., 1967).

A partire dal '700 cominciò a svilupparsi senza alcun freno l'usanza di scavare cave e recuperare materiale da costruzione nel sottosuolo delle aree di edificazione, soprattutto nel caso dei grandi edifici religiosi, al punto che a seguito dei continui dissesti edilizi, nel 1781 venne proibito con un editto qualsiasi scavo al di sotto dell'abitato (STRAZZULLO, 1996).

Il secolo XIX, sia durante il decennio francese che nel corso del lungo regno borbonico, fu caratterizzato da una continua espansione della città, dalla realizzazione di rilevanti opere pubbliche, dal nascere dei primi stabilimenti industriali e da interventi urbanistici come quelli di riqualificazione del quartiere di Chiaia e della zona del Rettifilo. A questo fervore di cambiamenti corrisposero altre cavità nei settori più settentrionali delle colline di

Capodimonte (Scudillo, S. Rocco) di Materdei e del Vomero.

L'espansione urbanistica dalla fine dell'800 a tutto il '900 è stata così intensa da richiedere l'apertura di nuove cave in zone sempre più lontane dal centro urbano, lungo la collina di Posillipo e l'area collinare dei Camaldoli e dei Colli Aminei, con conseguente impoverimento del patrimonio paesaggistico e creazione di insidie per l'abitato che hanno indotto le Autorità a emettere provvedimenti di disciplina dell'esercizio delle cave prima, e a disporre la chiusura delle cave in sotterraneo dopo, con la autorizzazione delle sole cave a cielo aperto.

Conseguenza di tale sfruttamento secolare del territorio è la presenza di un numero elevatissimo – e imprecisato – di cavità, di dimensioni generalmente rilevanti, che interessa gran parte del territorio napoletano, ad eccezione di alcuni settori, dove, per effetto degli eventi di collasso vulcanotettonico che hanno ribassato la formazione del Tufo Giallo Napoletano anche di alcune centinaia di metri (ORSI *et alii*, 1992) il tufo è presente a grandi profondità dal p.c. e non può essere soggetto a sfruttamento.

Le cave di tufo comprendono, innanzitutto, cavità con accesso "a raso", posto generalmente alla base dei rilievi o lungo i fianchi delle incisioni vallive. Sono molto diffuse nei settori esterni alla città antica (figg. 6, 7) ma presenti, in taluni casi, anche all'interno del tessuto abitativo.



Fig. 6—Cave con accesso a raso lungo il Vallone San Rocco (foto: P.M. Guarino).
— Access by grade to cavities along St. Rocco Valley (photo: P.M. Guarino).



Fig. 7 – Sviluppo in sotterraneo delle cave in Tufo Giallo Napoletano.
– Branching into subsoil of quarries dug in Neapolitan Yellow Tuff.

Anticamente, le cave avevano il “cielo” piano e le pareti a forma parabolica con fuoco lontano; la larghezza della volta non eccedeva i 5 m e l’altezza delle pareti non superava i 15 m. Alcuni esempi sono le grotte dei Cristallini, le cave lungo la via Vecchia di Capodimonte, a monte di piazza Dante, dei Ventaglieri e le cave Mangone presso la tomba di Virgilio.

Verso la fine del secolo XIX, questo metodo è stato sostituito da un diverso metodo di avanzamento che prevede una volta più arcuata e pareti di forma parabolica ad accentuata inclinazione, consentendo sviluppi verticali maggiori (fig. 8). L’utilizzo di questa tecnica si accompagnava, per effetto della necessità di reperimento di materiale, allo scavo di gallerie di traverso a quelle principali



Fig. 8 – Cava in tufo giallo con volta arcuata e pareti di forma parabolica ad accentuata inclinazione (foto: P.M. Guarino).
– Quarry dug in yellow tuff, with curved ceiling and sharply accented parabolas walls (photo: P.M. Guarino).

di sbocco, lasciando esili pilastri di sostegno alle navate o l’ampliamento di vecchie cisterne in disuso (AA.VV., 1967).

Altro metodo di coltivazione, in disuso dal 1920 a Napoli, era quello a “bottiglia” o a “campana”. Esso prevedeva la realizzazione di un pozzo verticale a partire dal piano campagna, a sezione circolare, fino a raggiungere e superare il tufo sottostante per circa 5 metri, da dove iniziava la coltivazione vera e propria della cava. A questo scavo se ne affiancavano altri, a distanza, unendo con dei cunicoli le basi delle “campane” (AA.VV., 1967).

Infine, per quanto riguarda le cave in materiali sciolti, la coltivazione delle cave di pomici avveniva in passato mediante le *cd tane di lapillo*. Esse erano costituite da un accesso verticale, dal quale si dipartono una serie di bracci orizzontali in corrispondenza del livello produttivo corrispondente alla formazione delle Pomici Principali, formata da una sequenza di sette strati di pomici da caduta separati da livelli di ceneri (DI GIROLAMO *et alii*, 1984). Tali cave erano diffuse in corrispondenza dei pianori sommitali delle aree collinari e venivano abbandonate e gli accessi riempiti e chiusi sommariamente.

3.3. - ACQUEDOTTI

Nel 1885 entrò in esercizio il moderno acquedotto in condutture forzate, alimentato dalle sorgenti di Serino (Av), che ancora oggi contribuisce alla limentazione idrica dell’area metropolitana di Napoli.

Fino ad allora, per circa 2000 anni, l’approvvigionamento idrico è avvenuto a mezzo di acquedotti scavati, in parte o interamente, nel sottosuolo: l’acquedotto della Bolla, l’acquedotto Claudio e l’acquedotto del Carmignano.

Il più antico è probabilmente l’acquedotto della Bolla, anche se non si dispone di elementi ed informazioni che possano attribuire con certezza al periodo greco la realizzazione del suo ramo più antico (MICCIO & POTENZA, 1985), come riportato in MELISURGO (1889).

È molto verosimile che le necessità della città greca di *Neapolis* possano essere state soddisfatte inizialmente attraverso il prelievo dalle numerose

sorgenti e dal fiume Sebeto (DI STEFANO, 1967). Senz'altro, la presenza di manufatti in *opus reticulatum* lungo alcuni cunicoli sotterranei dell'acquedotto della Bolla consente di attribuire un'età quantomeno romana a parte dell'opera.

L'acquedotto della Bolla aveva origine in località Casa dell'Acqua nella frazione di Volla, ad est di Napoli, e consisteva in un canale interrato che raccoglieva le acque alla confluenza di alcune trincee drenanti, attraverso le quali veniva intercettata la falda accolta nelle alluvioni del fiume Sebeto.

Il canale, in opera muraria rivestita di intonaco, posto a pochi metri al di sotto del piano campagna, dopo un percorso di circa 2 km e dopo aver ricevuto il contributo di altre trincee drenanti, giungeva in corrispondenza della antica cinta muraria in prossimità del fossato di S. Anna a Capuana, dove proseguiva il suo tracciato sotterraneo all'interno della città antica, seguendo una sorta di spartiacque morfologico relativo posto alla quota di 12 m s.l.m., dal quale partivano i canali secondari ("rami") e le diramazioni, lungo le quali, a loro volta, venivano perforati i pozzi che approvvigionavano la popolazione (fig. 9).

Non soltanto gli abitanti utilizzavano l'acqua della Bolla ma, come riportato in MELISURGO (1889), verso la fine dell'800 essa alimentava fontane pubbliche, mulini, la Reale fabbrica delle armi e l'ospedale delle Prigioni a S. Francesco e veniva utilizzata per talune concessioni per irrigazione dei campi.

Pur rivelandosi col tempo sempre più inadeguato a fornire il quantitativo d'acqua necessario



Fig. 9 — Rete di cunicoli e cisterne appartenenti all'acquedotto della Bolla.
— Network of tunnel and cisterns belonging to the Bolla Aqueduct.

allo sviluppo urbano e industriale del territorio napoletano e a garantire le indispensabili condizioni di sicurezza e igiene, l'acquedotto della Bolla è rimasto funzionante fino alla realizzazione nel 1885 del moderno acquedotto del Serino.

L'acquedotto Claudio venne realizzato nel I secolo d.C. Esso attraversava, per mezzo di condotte sostenute da archi (*arcuationes*) il territorio compreso tra le sorgenti dell'Acquaro, nella valle del fiume Sabato nella provincia di Avellino e Palma Campania, dove si divideva in due rami: il primo diretto a Pompei e Nola e l'altro diretto ad Afragola (MICCIO & POTENZA, 1985).

Qui, l'acquedotto si sdoppiava ancora e il ramo principale proseguiva verso Napoli, attraverso un percorso sotterraneo lungo la collina di Capodichino, sbucando nella cupa di Miano nella località Ponti Rossi (fig. 10).



Fig. 10 — Ruederi dell'acquedotto Claudio (foto: P.M. Guarino).
— Remnants of Claudio Aqueduct (photo: P.M. Guarino).

Dopo aver attraversato le falde meridionali della collina di Capodimonte, l'acquedotto Claudio proseguiva attraverso l'attuale Orto Botanico e, con un ramo, portandosi verso Porta Donnorsò entrava in Napoli mentre con l'altro ramo superava la collina del Vomero, attraversava la collina di Posillipo fiancheggiando in galleria la *Crypta Neapolitana* e, percorrendo l'attuale via Terracina dove alimentava un importante complesso termale, proseguiva verso Pozzuoli e Baia dove alimentava il grandioso serbatoio della *Piscina Mirabilis*.

Importanti interventi di restauro furono compiuti

in età flavia, forse per ovviare i danni dovuti agli eventi sismici del 62 d.C. e all'eruzione del 79 d.C., e sotto Costantino nel 324 (AMALFITANO *et alii*, 1990).

Non si possiedono dati certi sull'utilizzo in epoca successiva dell'acquedotto Claudio, probabilmente danneggiato anche in conseguenza dell'eruzione vesuviana del 472 d.C. (eruzione di Pollena).

Secondo taluni storici esso sarebbe stato distrutto dal principe dei Goti Belisario in occasione della conquista della città nel 537, quando vennero utilizzate le condutture dell'acquedotto per introdursi nella città assediata, come narra Procopio nella Guerra gotica ma, in ogni caso, è palese la successiva mancanza di ulteriori segnalazioni e citazioni del suo utilizzo. Si segnala la notizia dell'incarico affidato dal vicerè Don Pedro de Toledo all'ingegnere Lettieri di approntare un progetto per la sua riattivazione intorno al 1560 (MICCIO B. & POTENZA U., 1985).

L'acquedotto del Carmignano è il più recente degli antichi acquedotti al servizio della città di Napoli. Venne progettato e realizzato in pochi anni a spese di Cesare Carmignano, entrando in funzione nel maggio 1629.

Esso trae origine dalle sorgenti del fiume Faenza (oggi Isclero, in provincia di Benevento) e, dopo un percorso di 36 chilometri, giunto in località Licignano si suddivideva in due rami: il primo alimentava il Formale Reale, a sua volta tributario dell'acquedotto della Bolla, alimentando quindi la città, il secondo alimentava una serie di mulini nella zona orientale di Napoli. L'apporto delle acque del Carmignano produsse un notevole aumento della portata complessiva disponibile, che tuttavia, col passare del tempo riusciva a soddisfare sempre meno la popolazione, che nel censimento del 1765 contava circa 330.000 abitanti, raggiungendo i 450.000 abitanti con l'unificazione d'Italia (MICCIO B. & POTENZA U. (1985), rendendo indispensabile progettare verso la fine dell'800 il moderno acquedotto.

3.4. - COLLEGAMENTI VIARI ED ALTRO

L'odierno sistema dei collegamenti su ruota e su ferro al servizio dell'area urbana napoletana comprende numerosi tratti in sottosuolo, realizzati a partire dalla fine dell'800: le due gallerie stradali

che attraversano la collina di Pizzofalcone, la galleria stradale che collega Mergellina a Fuorigrotta, due linee metropolitane, due altre linee su ferro (circumflegrea e cumana) che collegano Napoli ai comuni flegrei, quattro funicolari.

Tuttavia, lo scavo di gallerie aventi funzione di via di collegamento risale al periodo romano, quando vennero realizzate le prime gallerie che agevolavano i collegamenti tra Napoli, Pozzuoli e la zona residenziale di Posillipo.

La *via per cryptam* da *Neapolis* a Puteoli, dalla zona dell'odierna Piazza del Municipio, attraverso la riviera di Chiaia giungeva al piede della collina di Posillipo, dove si apriva l'ingresso alla *Crypta Neapolitana* (CAMODECA *et alii*, 1990). Essa venne realizzata sotto la direzione dell'arch. L. Cocceio Aucto alla fine del I° sec. a.C. ; la galleria è lunga circa 700 metri, larga fra i 4 e i 5 metri ed alta tra i 5 e i 20 metri. Oltre che da fiaccole, veniva illuminata da due pozzi di luce.

Di poco più recente, la Grotta di Seiano deve il suo nome a L.E. Seiano, prefetto di Tiberio che commissionò l'ampliamento e la sistemazione della galleria realizzata circa cinquanta anni prima dall'architetto L. Cocceio Aucto, per collegare la villa di P.V. Pollione di Posillipo alle altre ville patrizie e ai porti di Puteoli e *Cumae*. La galleria, lunga circa 770 m è larga tra i 4 e 7 m ed alta fino a 9 m. Resa impercorribile dai crolli, la galleria fu restaurata intorno al 1840 da Ferdinando II di Borbone (CAMODECA *et alii*, 1990).

Al novero delle gallerie antiche può essere ascritto il tunnel borbonico, anche se realizzato solo poco meno di duecento anni fa. Si tratta di una galleria sotterranea che attraversa la collina di Pizzofalcone, realizzata tra il 1851 e il 1855 (fig. 11) allo scopo di consentire un rapido accesso a difesa della residenza reale borbonica delle truppe accasermate nei quartieri della Vittoria, San Pasquale e Ferrandina e, in alternativa, come via di fuga verso il mare della famiglia reale residente a Palazzo Reale (MININ *et alii*, 2013 e bibliografia citata).

Lo scavo della galleria fu contrassegnato da diverse interruzioni, legate al rinvenimento lungo il tracciato di cunicoli e cavità appartenenti all'acquedotto del Carmignano, a difficoltà tecniche di avanzamento nei terreni e non ebbe mai un definitivo



Fig. 11 – Il tunnel borbonico (foto: G. Minin).
– *The tunnel Borbonico (photo: G. Minin).*

compimento, anche per il sopraggiungere degli eventi legati alla caduta del regno borbonico.

Infine, un breve cenno va fatto all'utilizzo delle cavità preesistenti come ricovero antiaereo durante l'ultimo conflitto bellico.

Il numero dei ricoveri bellici compresi nell'elenco stilato dalla Prefettura, aggiornato al 30.04.1943, comprende un totale di 420 strutture, di cui 169 sono anticrollo, ovvero ambienti realizzati con opere di consolidamento nelle fondazioni di edifici quasi esclusivamente di proprietà privata; le rimanenti 251 si sviluppano in cavità tufacee; di quest'ultime un centinaio non sono state ancora individuate e censite nel Catasto Cavità del Comune di Napoli.

4. - ANTHROPOGENIC SINKHOLES A NAPOLI

I sinkholes antropogenici costituiscono un evento ricorrente nell'area napoletana ed infatti le

cronache riportano sempre con maggiore frequenza la formazione di voragini che coinvolgono il tessuto (figg. 12, 13).

Il danno indotto dai sinkholes nel territorio comunale in termini di costi sociali e, talora, di vite umane, è rilevante.

Il fenomeno è molto antico, le voragini hanno



Fig. 12 – Sinkhole del 26 dicembre 1996 in via Miano (Napoli).
– *View of 26th December 1996 sinkhole in Miano Street (Naples).*



Fig. 13 – Sinkhole provocato dal crollo della volta di una cava in tufo in via Scaglione 8 (foto: Comune di Napoli).
 – Sinkhole due to the collapse of underground cavity in Scaglione Street (photo: Naples Municipality).

da sempre caratterizzato la città: “...*Ciò non è casuale perché nelle frane e nelle voragini si specchia la condizione complessiva di questa città*” (BINI, 1978).

Le ricerche storiche condotte hanno portato al reperimento di cronache storiche e di antiche segnalazioni. Nel 1728, ad esempio, un'enorme voragine si verificò nella strada delle Fontanelle (quartiere della Sanità) in conseguenza di un evento alluvionale, probabilmente legata alla presenza di una cavità ipogea di origine antropica (ESPOSITO, 2007); uno sprofondamento si originò, durante i lavori di scavo del tunnel borbonico, nel 1855, nel cortile del palazzo del duca di S. Cipriano ubicato sulla verticale della galleria (CATAPANO, 2010).

I fenomeni si intensificarono negli anni del boom economico e dell'espansione edilizia: “*Dal 1966 al '69 si sono verificati, a Napoli, oltre 60 tra voragini, crolli, frane e sprofondamenti, più di 4 mila dissesti edilizi e stradali. Il bilancio è stato di undici morti e 400 feriti, migliaia di persone sfrattate da alloggi...*” (AA. VV.; 1973).

PERRONE CAPANO, a tal proposito, riporta ... “*In quella zona del Vomero, dove i palazzini sono stati costruiti uno addosso all'altro senza soluzione di continuità le voragini sono frequenti, sempre provocate dalla rottura del vecchio collettore fognario Montella che taglia perpendicolarmente le strade della collina. Tre anni fa franò un tratto di via Aniello Falcone. Si spalancò una bocca che inghiottì il farmacista Alfredo Cerrato. Il suo corpo trascinato a valle*

dai detriti fu ritrovato dopo tre giorni...” (AA.VV, 1973).

È sempre mancato tuttavia un censimento delle voragini a Napoli, tuttavia, importanti contributi allo studio del fenomeno e alla realizzazione della banca dati sono riportati in: AA.VV. (1967); CATENACCI (1992); RASULO (2000); CORAZZA (2004); CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (2010).

Recentemente, attraverso la verifica delle segnalazioni riportate in bibliografia e l'acquisizione di ulteriori dati presso Enti e Agenzie, è stato avviato dall'ISPRA, un censimento aggiornato dei sinkholes antropogenici a Napoli (GUARINO & NISIO, 2013), con dati temporalmente compresi tra gli inizi del '900 e il 2010.

Vengono qui presentati i nuovi risultati, aggiornati al 2012, della ricerca ancora in corso (fig. 14).

L'analisi integrata delle informazioni relative agli eventi e di quelle relative all'assetto stratigrafico del sottosuolo, alla distribuzione della rete caveale sotterranea e dei sottoservizi ed alla pluviometria, ha consentito di definire l'incidenza dei diversi fattori causali e di proporre una zonazione preliminare del territorio del comune di Napoli in termini di suscettibilità ai fenomeni di sprofondamento (GUARINO & NISIO, 2012).

In definitiva, tutti gli sprofondamenti riconosciuti appartengono alla tipologia degli *anthropogenic sinkholes* (CULSHAW & WALTHAM, 1987; FORD & WILLIAMS, 1989; GUNN, 2004; JENNINGS, 1985; MONROE, 1970; NISIO, 2003, 2008; NISIO & SALVATI, 2004; SWEETING, 1972; WALTHAM & FOOKERS, 2003; WHITE, 1988); essi sono distribuiti nell'intero territorio del comune di Napoli, con una marcata concentrazione nel settore centrale (fig. 14).

Il diametro è generalmente inferiore a 10 m, la profondità supera i 6 m solo nel 20% dei casi; la forma dello sprofondamento varia da sub-circolare a molto irregolare; sono coinvolti terreni esclusivamente di origine vulcanica.

Tra gli eventi con maggiori danni e ripercussioni, si ricorda, ad esempio, quello avvenuto nel novembre 1969, quando le prolungate precipitazioni provocarono l'esondazione delle acque di ruscellamento superficiale raccolte dalla vasca Teglia e il conseguente allagamento di una vasta area compresa tra via Marconi e via Macello, alla periferia settentrionale di Napoli. L'infiltrazione del-

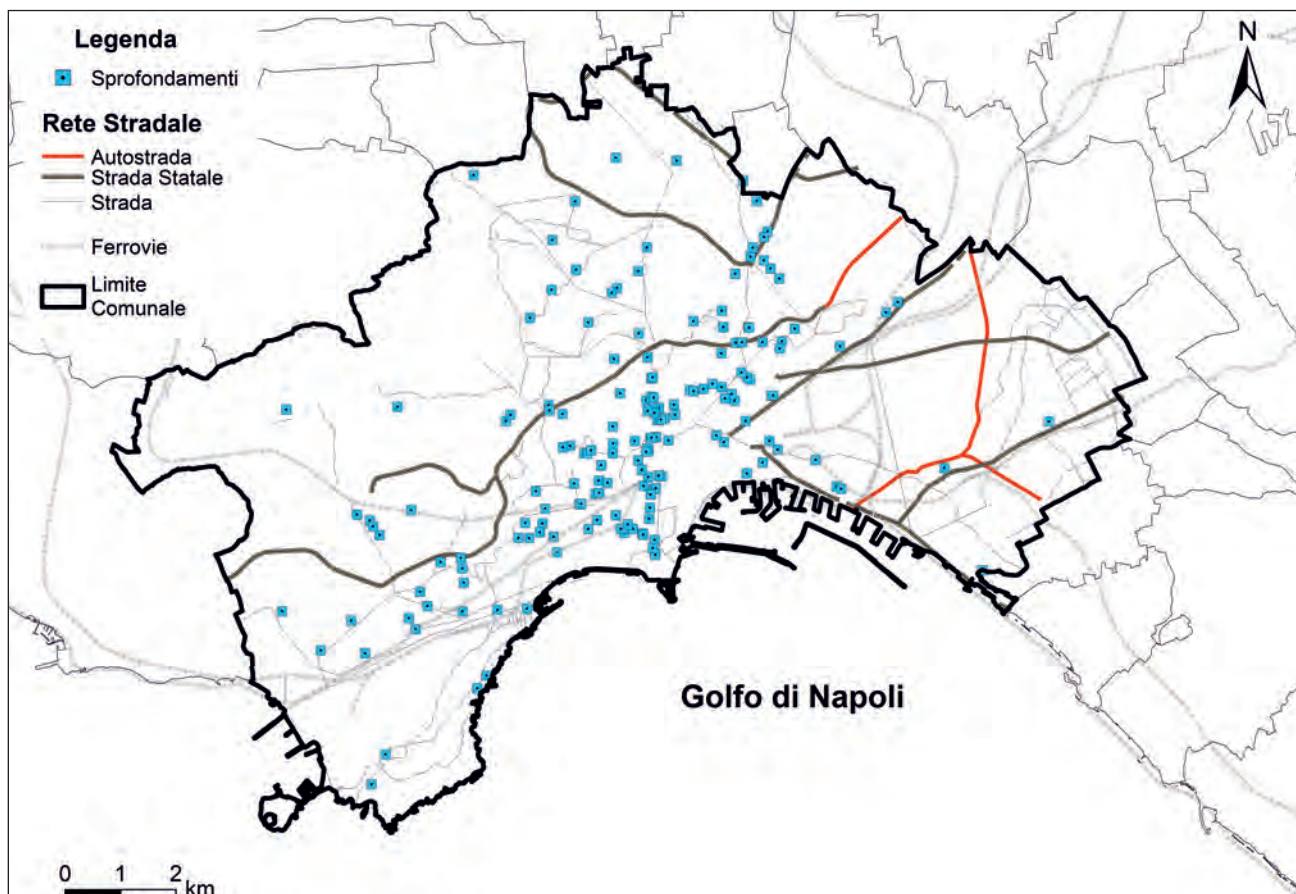


Fig. 14 – Ubicazione dei sinkholes censiti nel territorio del comune di Napoli.
 – Location of sinkholes recorded in the municipality of Naples.

l'acqua nel sottosuolo provocò, a sua volta, il crollo di alcune cavità sotterranee e di un edificio. Dopo qualche giorno, gli sfollati a scopo precauzionale erano circa 3000 (IL MATTINO, 1 dicembre 1969).

Ma andrebbero citati numerosi altri accadimenti, come quello del dicembre 1953, quando, a seguito delle prolungate precipitazioni si aprì una voragine profonda circa 30 m in via Forno Vecchio, nel centro di Napoli, per il cedimento di un pozzo di accesso a una cavità sottostante, con il conseguente sgombero di 30 famiglie (IL MATTINO, 30 dicembre 1953), oppure quello del settembre 1979 che portò alla luce gli insediamenti sepolti al tempo della realizzazione nell'800 del Corso Amedeo di Savoia (fig. 15), o, venendo ai giorni nostri, quello del settembre 2009, che ha interessato la chiesa di S. Carlo alle Mortelle determinando il crollo del pavimento del sagrato della chiesa.

In particolare, il 12 dicembre 1996, a seguito di prolungate e intense precipitazioni, una voragine



Fig. 15 – Settembre 1979: sinkhole in corso Amedeo di Savoia (fonte: http://www.nisalfe.it/PAGINE/pagina_NAPOLI/sottosuolonapoli.pdf).
 – September 1979: sinkhole occurred in Amedeo di Savoia Street (from: http://www.nisalfe.it/PAGINE/pagina_NAPOLI/sottosuolonapoli.pdf).

di circa 4 x 3 metri di diametro si aprì improvvisamente in via Miano nel quartiere di Capodimonte, inghiottendo parte dell'officina di un fabbro e provocando la morte di due persone.

Le operazioni di recupero delle salme da parte dei Vigili del Fuoco consentirono di accertare la presenza nel sottosuolo dell'area di un antico collettore di età borbonica: per effetto delle precipitazioni, parte della volta della cavità attraversata dal collettore era franata determinando il restringimento della sezione di deflusso del collettore stesso e la risalita del livello dell'acqua. Quest'ultima, a sua volta, aveva determinato il cedimento di una canna di pozzo che attraversava i terreni piroclastici sciolti a tetto del tufo (fig. 16).

Per quanto riguarda i meccanismi genetici degli sprofondamenti, essi sono legati alla esistenza di due fattori predisponenti fortemente interagenti tra di loro: l'inadeguatezza del sistema di smaltimento delle acque fognarie e meteoriche e l'esistenza di una complessa rete caveale sotterranea; il ruolo di fattore di innesco è svolto generalmente dalle precipitazioni meteoriche e, subordinatamente, dall'azione antropica, come l'esecuzione di lavori di manutenzione sugli edifici o sul territorio.

In dettaglio, circa il 55% degli sprofondamenti censiti è dovuto al malfunzionamento o alla rottura dei collettori fognari che si verifica in concomitanza di eventi meteorici intensi. Ciò accade perché la rete dei collettori fognari e di raccolta delle acque meteoriche che serve il territorio cittadino trae le sue origini

da uno schema principale realizzato tra il 1889 e il 1915, che ha dovuto adeguarsi alle mutate esigenze del tessuto urbano, rivelandosi spesso inadeguato.

Le cause principali di tale inadeguatezza sono: 1) la insufficiente capacità di smaltimento, legata all'incremento della superficie dei bacini drenati e all'accumulo di sedimenti all'interno delle canalizzazioni, che comporta il frequente funzionamento in pressione di canalizzazioni progettate inizialmente per un funzionamento a superficie libera; 2) la mancanza di un programma di gestione e manutenzione delle opere (RASULO, 2000).

Quando si verifica la perdita da un collettore, l'erosione operata dall'acqua nel terreno circostante, determina il dissesto, generalmente limitato all'area immediatamente prossima alla rottura.

Per avere un'idea della frequenza del fenomeno, basti pensare che, sulla base dei rapporti di intervento effettuati tra il 1986 e il 1996 dal Corpo Provinciale dei VV. F., sono stati censiti all'interno del territorio comunale di Napoli oltre 600 dissesti relativi solo a quel decennio, concentrati nella zona più antica del centro cittadino (RASULO, 2000).

In una percentuale ridotta di casi, l'erosione del terreno provocata dalla rapida infiltrazione di ingenti volumi d'acqua porta alla formazione di una cavità più ampia, il cui collasso dà origine allo sprofondamento in superficie.

Relativamente al periodo esaminato, compreso tra il 1986 e il 1996, vengono riconosciuti 15 sinkholes provocati dal malfunzionamento della rete fognaria (GUARINO & NISIO, 2012).

Le condizioni di inadeguatezza della rete di smaltimento fognaria interessano, sia pure con modalità diverse, l'intero territorio cittadino. Gli studi svolti nell'ambito delle attività del Commissario Straordinario per gli interventi d'emergenza connessi con il sottosuolo (ex Ordinanza del Ministero degli Interni 2509/97) analizzano in dettaglio le numerose criticità, che vanno dalla assenza di una rete fognaria adeguata e all'elevata quantità di trasporto solido nelle condutture nell'area occidentale del territorio comunale, al frequente funzionamento in pressione dei collettori dell'area centrale, alla inadeguatezza della rete di drenaggio secondaria alla espansione urbanistica del settore orientale (RASULO, 2000).

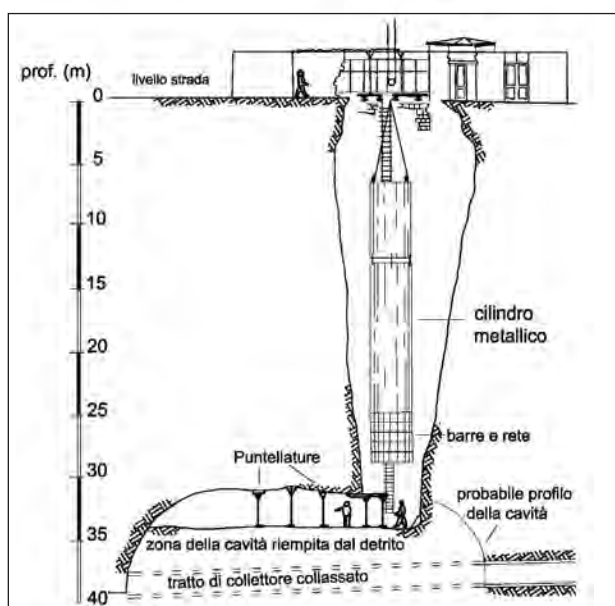


Fig. 16 – Sinkhole del 26 dicembre 1996: sezione del sottosuolo e intervento dei VV.F. (fonte: Comune di Napoli).

– 26th December 1996 sinkhole: section of the subsoil and Fire Department squad's intervention (from Naples Municipality).

Infine, va sottolineato che, anche se non si dispone di osservazioni specifiche di dettaglio, si ritiene che l'abbattimento della resistenza al taglio che si realizza nei terreni piroclastici sciolti a granulometria fine per rapido aumento del contenuto d'acqua (PICARELLI & OLIVARES, 2001) possa provocare in taluni casi il collasso strutturale del terreno – e conseguente sprofondamento in superficie – senza la formazione di un vero e proprio vuoto al di sotto del piano campagna.

Circa il 25% degli sprofondamenti censiti è legato al crollo di una cavità sotterranea o di un accesso ad essa (GUARINO & NISIO, 2012).

Il sottosuolo dell'area napoletana, infatti, è interessato da una complessa ed estesa rete caveale che interessa le formazioni lapidee (Tufo Grigio e Piperno appartenenti alla unità dell'Ignimbrite Campana, Tufo Giallo Napoletano e Tufo rosso a scorie nere della unità di Casoria), le cui forme e dimensioni sono estremamente variabili, comprese tra quelle degli stretti cunicoli degli antichi acquedotti, che a malapena consentono il passaggio di una persona, peraltro lunghi molte centinaia di metri, e quelle delle cave di tufo con altezza anche maggiore di 30 m.

Alle cavità in formazioni lapidee occorre aggiungere le cave in piroclastiti sciolte, costituite da un accesso verticale dal quale si dipartono una serie di bracci orizzontali in corrispondenza del livello produttivo corrispondente alla formazione delle Pomici Principali *Auct.* Tali cave, dette anche “*tane di lapillo*” erano diffuse in corrispondenza dei pianori sommitali delle aree collinari e venivano abbandonate e gli accessi riempiti e chiusi sommariamente.

La relazione che lega uno sprofondamento in superficie alla presenza di una cavità in sottterraneo può essere di vario tipo, ed è funzione della forma, dimensioni e profondità delle cavità, spessore e caratteristiche litologiche e geotecniche dei terreni sovrastanti e/o costituenti la cavità.

Essa può essere diretta, senza l'intervento di altre concause, quando l'evoluzione dello stato tensionale e deformativo della roccia che costituisce l'intorno e la volta della cavità determina il raggiungimento delle condizioni di rottura e il collasso, con conseguente sfornellamento in superficie.

Si tratta di un avvenimento registrato molto raramente anche se gli studi presenti in letteratura

evidenziano che le condizioni di stabilità delle cave in tufo generalmente non sono elevate, sia per quanto riguarda la volta (sovente interessata da fenomeni di degradazione e di distacco di blocchi) che per quanto riguarda i pilastri, frequentemente interessati da fratture e lesioni (EVANGELISTA *et alii*, 1980; GUARINO & MINUTOLO, 2010).

La relazione sprofondamento/cavità può essere anche diretta, ma indotta dal rapido peggioramento delle condizioni di stabilità della volta della cavità a seguito dell'infiltrazione di acqua per la rottura o malfunzionamento dei collettori fognari o, semplicemente, per infiltrazione concentrata a seguito di un evento meteorico eccezionale.

Si tratta della tipologia di sprofondamento più frequente. Essa si verifica in corrispondenza 1) degli accessi alle cave di lapillo; 2) degli accessi verticali alle cave di tufo che, dopo l'abbandono, venivano in larga parte occlusi mediante riempimenti e scarico di materiale di risulta, dalle scadenti proprietà geotecniche e elevata permeabilità e 3) dei pozzi che si alimentavano dalle antiche cisterne.

Infine, la relazione sprofondamento/cavità può essere di tipo indiretto, quando la presenza di una cavità sotterranea esercita soltanto una azione di richiamo del materiale terroso fine eroso dalle acque di infiltrazione, agevolando la formazione di un vuoto.

Il restante 20% circa dei casi di sprofondamento comprende, oltre a quelli per i quali le informazioni sono risultate insufficienti ai fini della ricostruzione dei meccanismi genetici, quelli in cui il ruolo di fattore di innesco è stato svolto dalla realizzazione di lavori di sbancamento o dalla rottura di condotte di adduzione dell'acquedotto.

5. - LO STUDIO DELLA SUSCETTIBILITÀ AGLI SPROFONDAMENTI

Come per il caso di Roma (CIOTOLI *et alii*, in questo volume) anche per l'area del Comune di Napoli è stata applicata la tecnica della regressione logistica per la costruzione di un modello che esprime la probabilità nello spazio ed in un tempo infinito del verificarsi di uno sprofondamento. Per gli aspetti teorici relativi alla tecnica della regressione logistica si può fare riferimento al lavoro di CIOTOLI

et alii, in questo volume. Di seguito saranno presentati i risultati ottenuti nell'area di Napoli.

6. - RISULTATI

Il *database* dei fenomeni di sprofondamento censiti nel Comune di Napoli comprende, al momento, 171 casi di estensione compresa fra i 10 e i 200 m² e con profondità variabile da 0.5 a 30 m. La figura 14 mostra la Carta dell'ubicazione degli sprofondamenti.

Il *geodatabase* spaziale utilizzato comprende, oltre all'inventario degli sprofondamenti, informazioni relative ad una serie di strati informativi relazionabili a potenziali fattori predisponenti: fattori orografici (DTM), fattori geologici (mappa geolitologica), fattori idrologici (piezometria e spessore dell'insaturo), fattori antropici (cavità e rete dei sottoservizi) (fig. 17).

Tutti gli strati informativi sono stati trasformati in un formato *raster* con una dimensione del *pixel* di 250×250 m e sono stati analizzati mediante *software* GIS (ESRI ®ArcMap™ 10). L'elaborazione di alcuni degli strati informativi di base ha prodotto altri strati informativi utilizzati per la costruzione del modello probabilistico di suscettibilità.

Fattori orografici. Nel caso specifico è stato utilizzato un modello digitale delle quote (DTM) con una risoluzione di 20 x 20 m e con valori della quota compresi tra 1 e 300 m s.l.m. Il DTM è stato utilizzato per elaborare una mappa delle aree depresse ("sink") mediante il *software* ArcHydro (Copyright © 2009 ESRI) le quali costituiscono possibili zone di accumulo di acqua che a lungo termine possono influenzare le caratteristiche meccaniche dei materiali. Di seguito, è stata elaborata anche una carta della distanza degli sprofondamenti dal "sink" più vicino.

Fattori geologici. È stata utilizzata la cartografia

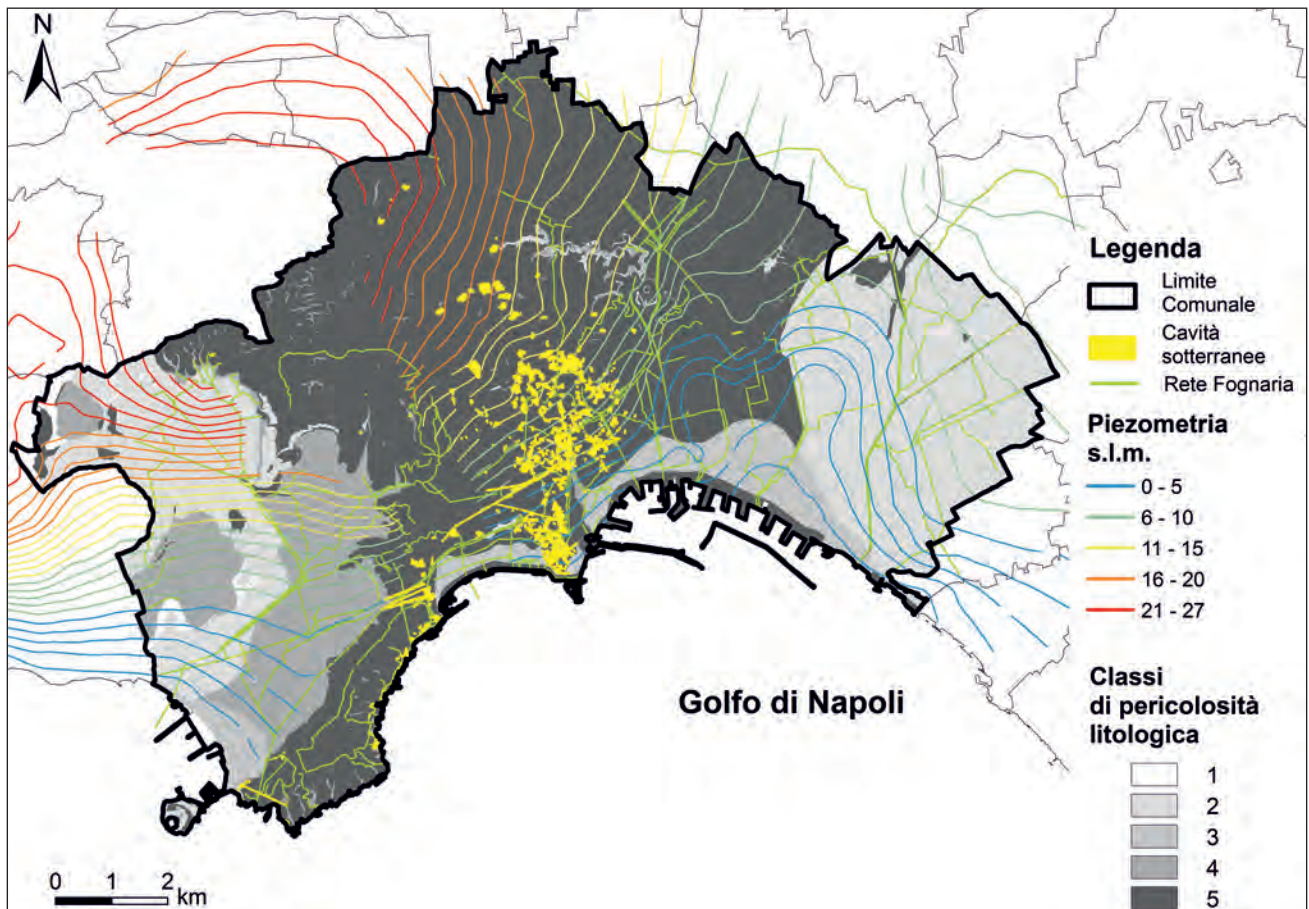


Fig. 17 – Mappa dei fattori predisponenti i sinkholes antropogenici considerati nell'analisi di regressione.

– Maps of the conditioning factors considered in the logistic regression analysis.

geologica dell'area del Comune di Napoli (scala 1:10.000). Le formazioni litologiche sono state distinte in classi di suscettibilità in funzione della frequenza percentuale relativa alla presenza di sprofondamenti in ogni classe. La frequenza è stata utilizzata per pesare l'area delle unità litologiche presenti all'interno della cella elementare della griglia raster in funzione dell'area totale della cella di griglia. In questo modo la mappa delle unità litologiche viene pesata in funzione della presenza di sprofondamenti e trasformata in una variabile discreta che rappresenta le classi di suscettibilità litologica.

Fattori idrologici. La Carta delle isopieze è stata fornita dal Comune di Napoli. Dalla Carta delle isopieze è stata derivata la Carta della soggiacenza della falda superficiale per differenza con il DTM.

Fattori antropici. Tra i fattori predisponenti sono stati considerati: l'ubicazione delle cavità ipogee (*database* del Comune di Napoli), dalla quale sono state derivate la mappa di densità di cavità e la mappa delle distanze degli sprofondamenti dalla cavità più vicina; l'ubicazione della rete dei sottoservizi fognari (rete dei collettori) (fornita dal Comune di Napoli) che ha prodotto la Carta della densità della rete fognaria e la Carta delle distanze degli sprofondamenti dal collettore fognario più vicino.

6.1. - ANALISI DEI PATTERN

Nella prima fase di elaborazione è stata esaminata la distribuzione degli sprofondamenti censiti e delle possibili relazioni con i pattern degli altri tematismi puntuali e/o lineari mediante tecniche di statistica spaziale (*Point Pattern Analysis*, PPA) (O'SULLIVAN & UNWIN, 2003) con l'obiettivo di:

- individuare il baricentro spaziale e quantificare il grado di eterogeneità spaziale della distribuzione degli sprofondamenti identificando la presenza di una qualche direzione spaziale nel *pattern* di distribuzione dei dati (isotropia/anisotropia);
- acquisire informazioni sulla struttura (casuale, clusterizzata, uniforme) della distribuzione spaziale degli sprofondamenti;
- individuare, tramite la funzione di autocorrelazione spaziale, eventuali somiglianze tra località in funzione della loro distanza;

- individuare *cluster* territoriali;
- costruire, a partire da dati osservati mappe tematiche mediante tecniche di interpolazione spaziale.

Nell'ambito dei *software GIS* i risultati di queste analisi spaziali preliminari possono essere salvate in formato .shp e, proiettate sulla cartografia di base dell'area di studio (DAI & LEE, 2002). Questa possibilità permette di raggiungere due importanti scopi operativi:

- 1 - il confronto della distribuzione degli sprofondamenti in funzione della distribuzione di altri fattori, quali ad esempio la distribuzione della rete caveale, e dei sottoservizi, ecc.;
- 2 - il confronto della distribuzione degli eventi in tempi diversi per valutare se esiste un ampliamento della dispersione degli eventi e/o se esiste anche una direzionalità nell'ampliamento della dispersione collegabile con altri fattori, antropici e non.

In particolare, sono state applicate tecniche di analisi spaziali via via più complesse al fine di valutare l'interdipendenza tra i singoli eventi: il calcolo dei semplici indici relativi alle statistiche centrografiche (calcolo del centro medio e della distanza standard), l'analisi delle misure di distribuzione geografica (indice di vicinaggio), l'analisi dei raggruppamenti spaziali (*Cluster Analysis*) e l'analisi di densità.

Nell'ambito delle statistiche centrografiche sono stati calcolati il centro medio e l'ellisse della deviazione standard al fine di analizzare la dispersione spaziale degli elementi geometrici (punti/linee) che caratterizzano alcuni dei tematismi presenti nel *database*. Il risultato di questa analisi è una distanza che riassume la compattezza di un insieme di eventi, esso può essere rappresentato su una carta mediante una circonferenza/ellisse con il raggio pari al valore della distanza standard. Nei sistemi geografici informativi il calcolo della distanza standard porta ad un *output* che mostra il poligono (circonferenza/ellisse) che rappresenta la dispersione degli eventi intorno al suo centro medio geografico (fig. 18).

Il passo successivo permette di analizzare la presenza di "cluster" spaziali; lo studio dei *cluster* è importante per due motivi: 1) le attività antropiche non producono pattern di tipo casuale, e 2) spesso

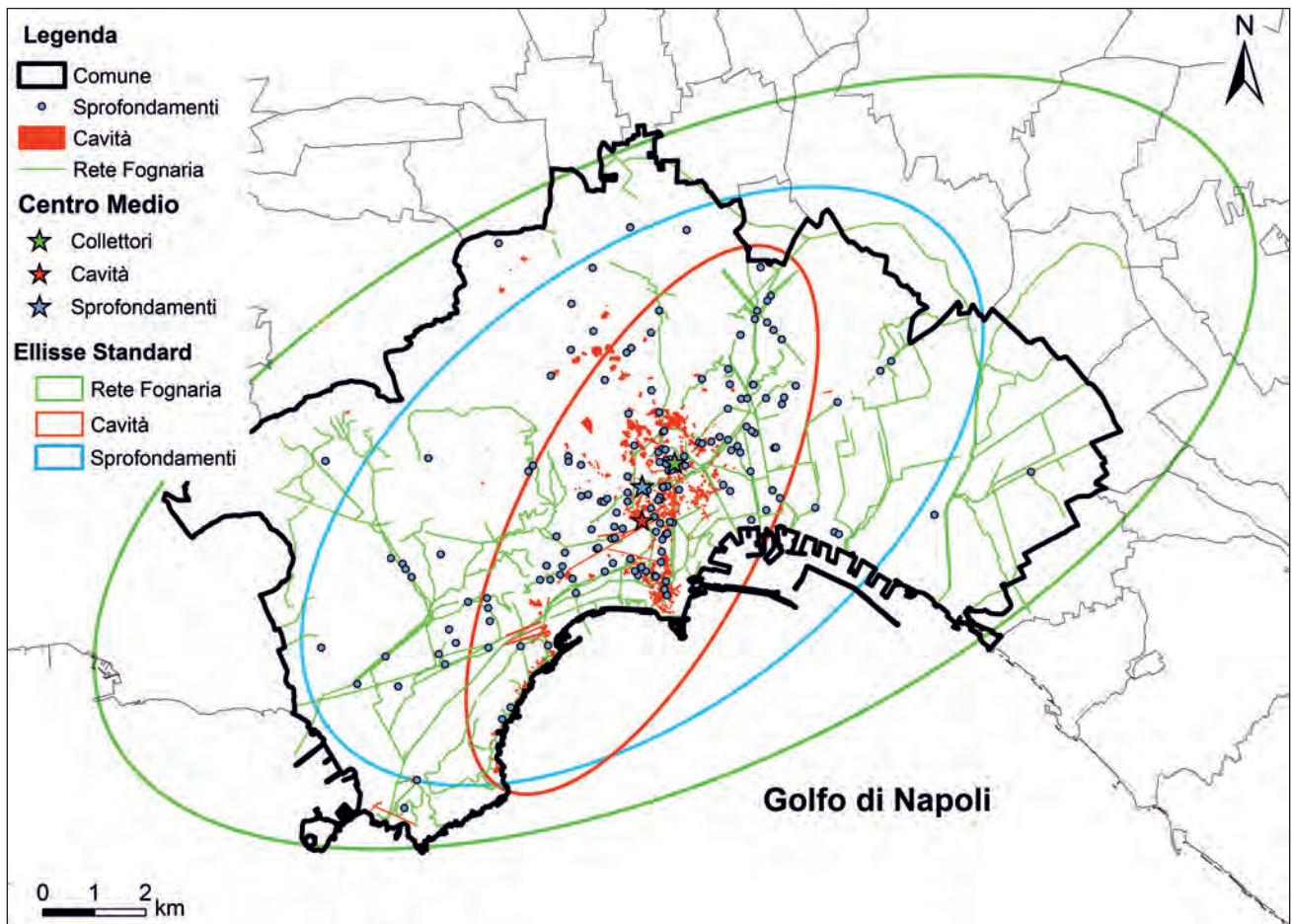


Fig. 18 – Analisi centro grafica e del *pattern* di distribuzione delle variabili caratterizzate da geometria puntuale e lineare (sinkhole, cavità e rete dei sottoservizi).
 – *Centrographic and pattern analysis of the linear and point conditioning factors (sinkholes, cavities and sewer network).*

l'analisi visiva tende a vedere raggruppamenti dove in realtà non esistono, questo per l'abitudine della mente umana a voler organizzare le informazioni spaziali (ROGERSON, 2001). Una delle tecniche più comunemente utilizzate e normalmente implementate nei sistemi geografici informativi è il calcolo dell'Indice di Vicinaggio (*Nearest Neighbor Index*, NNI) che confronta la distribuzione dei punti (in questo caso degli sprofondamenti) con una distribuzione casuale tipo. L'indice di vicinaggio misura la distanza tra ogni evento e il suo più vicino e ne fa la media. Se la distanza media è inferiore a 1 (media per un ipotetica distribuzione casuale), la distribuzione degli eventi è raggruppata ("cluster"). Se la distanza media è maggiore di 1 la distribuzione degli eventi è dispersa. La conoscenza del tipo di *pattern* degli eventi permette oltre al calcolo di una distanza media, utilizzabile per altre elaborazioni spaziali, anche la formulazione

di ipotesi sul possibile legame tra presenza di sprofondamenti e altri fattori predisponenti.

La figura 19 mostra i risultati dell'analisi di vicinaggio effettuata sulla distribuzione degli sprofondamenti, delle cavità e della rete fognaria. Il *pattern* di distribuzione per i diversi tematismi considerati risulta:

- raggruppato per tutti e tre i *layers* e quindi significativamente differente da un *pattern* casuale (z-score negativo);

- la distanza media tra gli sprofondamenti (298.42 m) è minore di quella attesa (450.66 m, *Nearest Neighbor Ratio* = 0.66) per una distribuzione casuale di punti nella stessa area (circa 139 km²);

- la distanza media tra le cavità (18.35 m) è minore di quella attesa (106.09 m, *Nearest Neighbor Ratio* = 0.17) per una distribuzione casuale di punti nella stessa area (circa 139 km²);

- la distanza media tra i segmenti della rete fo-

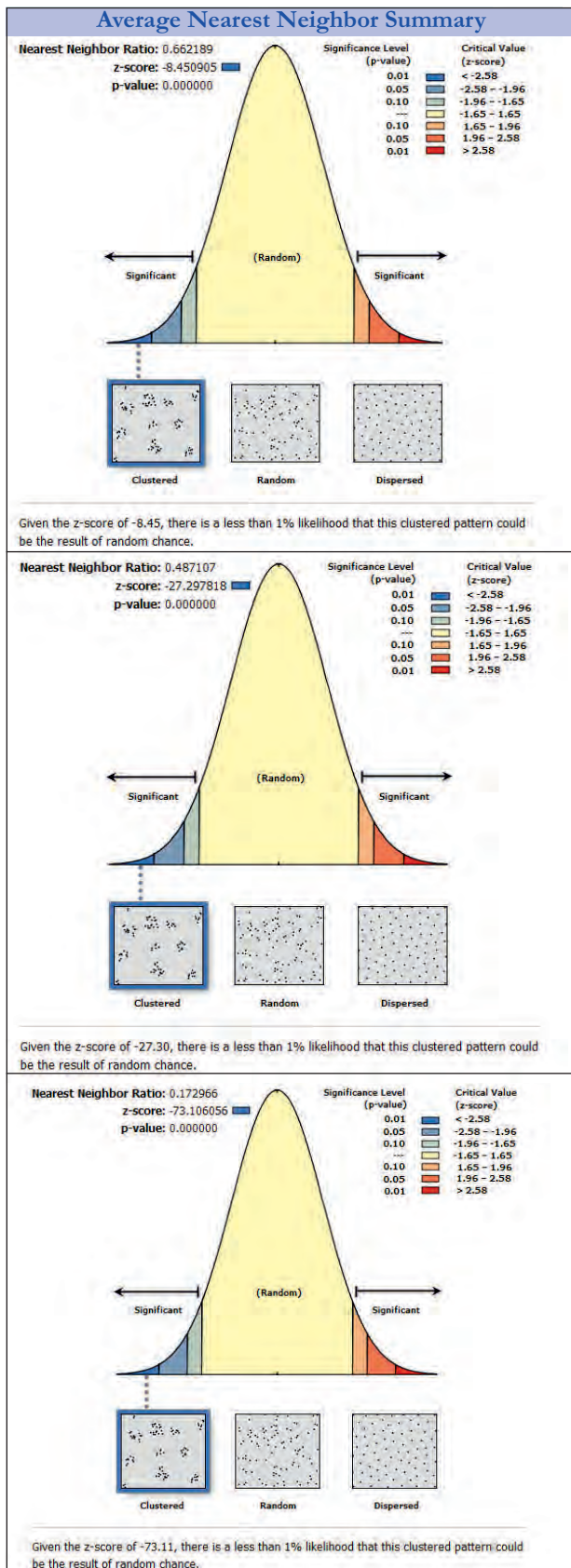


Fig. 19 – Grafici relativi ai risultati ottenuti dall'analisi di vicinaggio delle variabili caratterizzate da geometria puntuale e lineare (sinkhole, cavità e rete dei sottoservizi). – Results of the neighboring analysis of the linear and point conditioning factors (sinkholes, cavities and sewer network).

gnaria (122.75 m) è minore di quella attesa (252.01 m, *Nearest Neighbor Ratio* = 0.48) per una distribuzione casuale di punti nella stessa area (circa 139 km²).

L'informazione dell'indice di vicinaggio oltre a fornire una distanza media fra gli eventi è fondamentale per l'applicazione di ulteriori tecniche di analisi spaziale.

L'analisi di densità della distribuzione degli eventi costituisce una tecnica fondamentale e semplice per determinare l'area più incline alla presenza di sprofondamenti. Nelle zone in cui si sono verificati eventi di collasso è più probabile che se ne verifichino altri (BRZEZINSKI, 2004). L'applicazione dell'algoritmo di *Kernel* (*Kernel Density Estimation*) (SILVERMAN, 1986) permette il calcolo del numero di eventi intorno ad ogni sprofondamento che ricade all'interno di un'area di vicinaggio stabilita (NNI). Di conseguenza ogni evento riceve un attributo che è la densità di eventi nella sua zona circostante. L'*output* che ne deriva è costituito da mappe ad isolinee di densità di evento (fig. 20). La figura mostra la densità di sprofondamento nell'area del Comune di Napoli. Questo tipo di elaborazione costituisce una mappa di pericolosità di primo livello in quanto il numero di eventi per unità di area rappresenta una prima indicazione sulle aree in cui è più probabile si manifestino nuovi eventi. L'algoritmo di *Kernel* è stato utilizzato, inoltre, per elaborare le mappe di densità di cavità sotterranee e di densità di elementi lineari legati alla rete fognaria; tali mappe saranno di seguito utilizzate per l'elaborazione della mappa di suscettibilità nell'ambito delle tecniche di regressione multivariata (fig. 21 a, b).

Un'ulteriore analisi comunemente implementata nell'ambito dei sistemi geografici informativi è l'analisi di prossimità che in maniera simile alla costruzione di fasce di rispetto permette di osservare le relazioni di vicinanza tra set di dati differenti al fine di valutarne l'influenza reciproca. Ad esempio, applicando l'analisi di prossimità tra la distribuzione degli sprofondamenti e la distribuzione della rete dei collettori fognari è possibile evidenziare la vicinanza degli sprofondamenti alla rete fognaria, e di conseguenza valutare quanti degli eventi potrebbero essere legati ad effetto di dilavamento dei

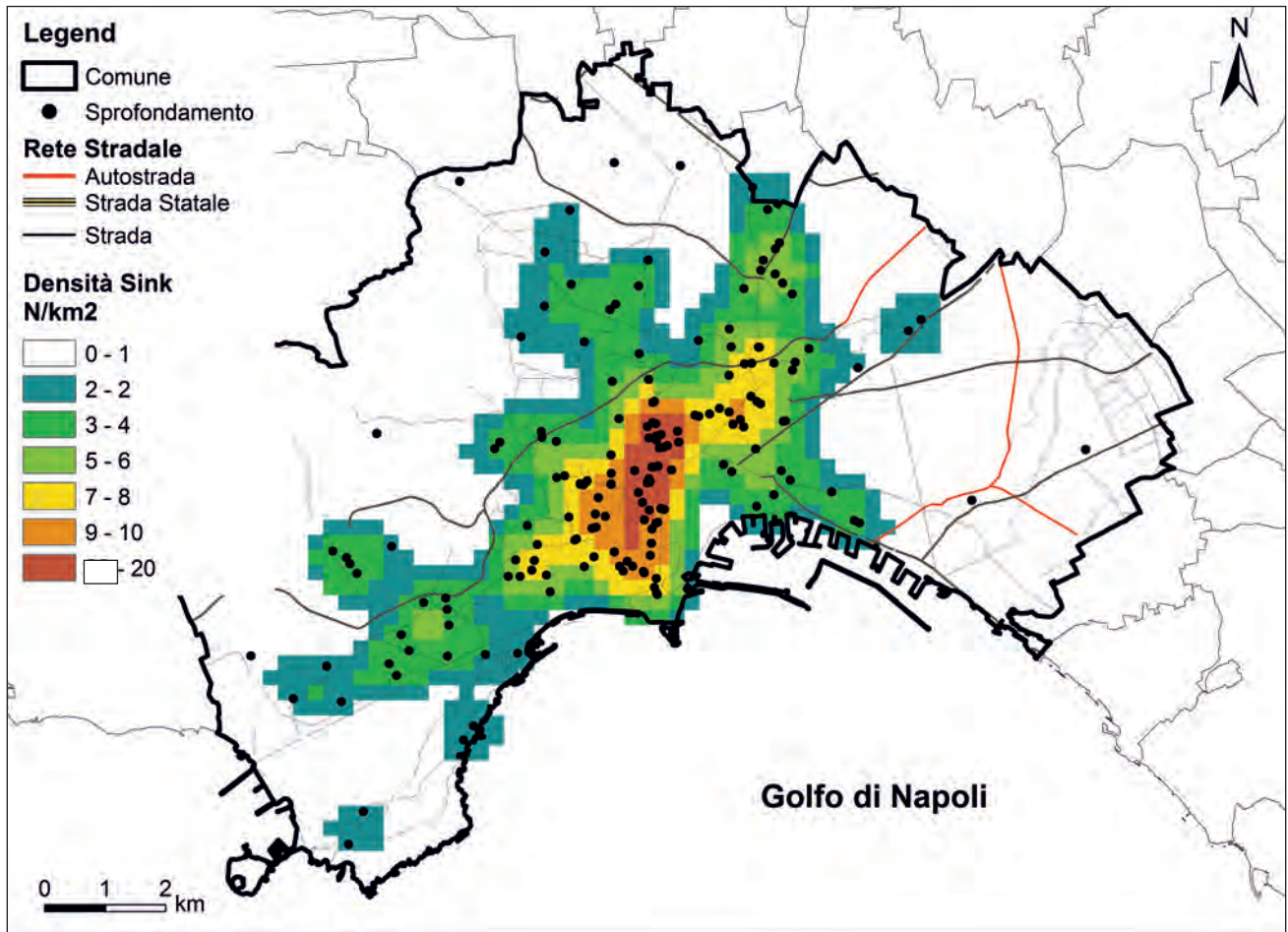


Fig. 20 - Mappa della densità di sprofondamento elaborata mediante algoritmo di Kernel.
 - Sinkholes density map of the Naples district created by using Kernel algorithm.

riporti superficiali (fig. 22). In questo modo gli eventi sono stati suddivisi per classi di distanza dal collettore più vicino. Un tale tipo di rappresentazione costituisce una prima analisi per la valutazione dell'influenza di altri fattori predisponenti sul verificarsi dell'evento. Allo stesso modo è possibile analizzare la vicinanza dello sprofondamento ad altri fattori predisponenti quali la rete caveale, gli alvei sepolti, ecc.

6.2. - REGRESSIONE LOGISTICA E MAPPA DI SUSCETTIBILITÀ

Nell'ambito della mappatura delle pericolosità ambientali costituisce un punto chiave la pesatura dei fattori predisponenti (variabili indipendenti) in funzione della loro importanza nel fenomeno investigato, peso che generalmente viene assegnato in maniera euristica. L'approccio statistico prevede

l'applicazione delle tecniche della statistica multivariata con particolare riferimento alla regressione logistica (RL) mediante la quale è stata studiata l'interazione e la dipendenza tra i fattori che predispongono il fenomeno, nella loro combinazione simultanea, e il verificarsi di uno sprofondamento al fine di stabilire l'influenza che ognuno di essi esercita nell'innescare del fenomeno. La tecnica della RL esprime i risultati in termini di probabilità che il fenomeno si manifesti in un certo punto dello spazio in un tempo infinito.

Ciascun strato informativo, dunque, rappresenta un fattore che condiziona la probabilità di verificarsi di uno sprofondamento, il cui peso di ogni fattore predisponente è rappresentato dal relativo coefficiente (b) della RL. Il software utilizzato (SPSS Statistics v17.0, Copyright 1993-2007, Polar engineering and Consulting) permette di gestire le variabili indipendenti in modo diverso in relazione alla

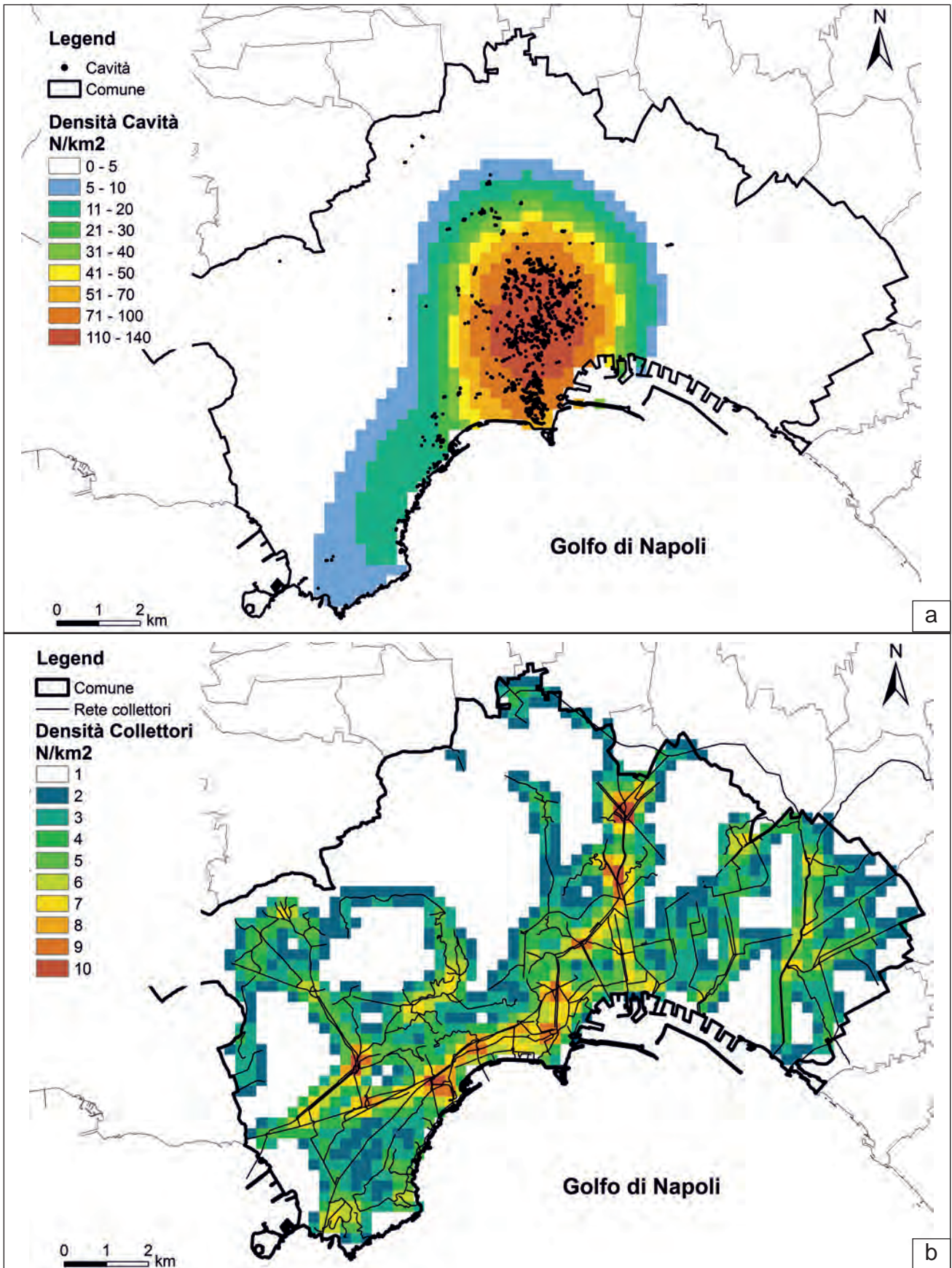


Fig. 21 – Mappa della densità di cavità (a) e della rete dei sottoservizi (b), elaborate mediante algoritmo di Kernel.
 – (a) Cavities density and sewer maps (b) of the Naples district created by using Kernel algorithm.

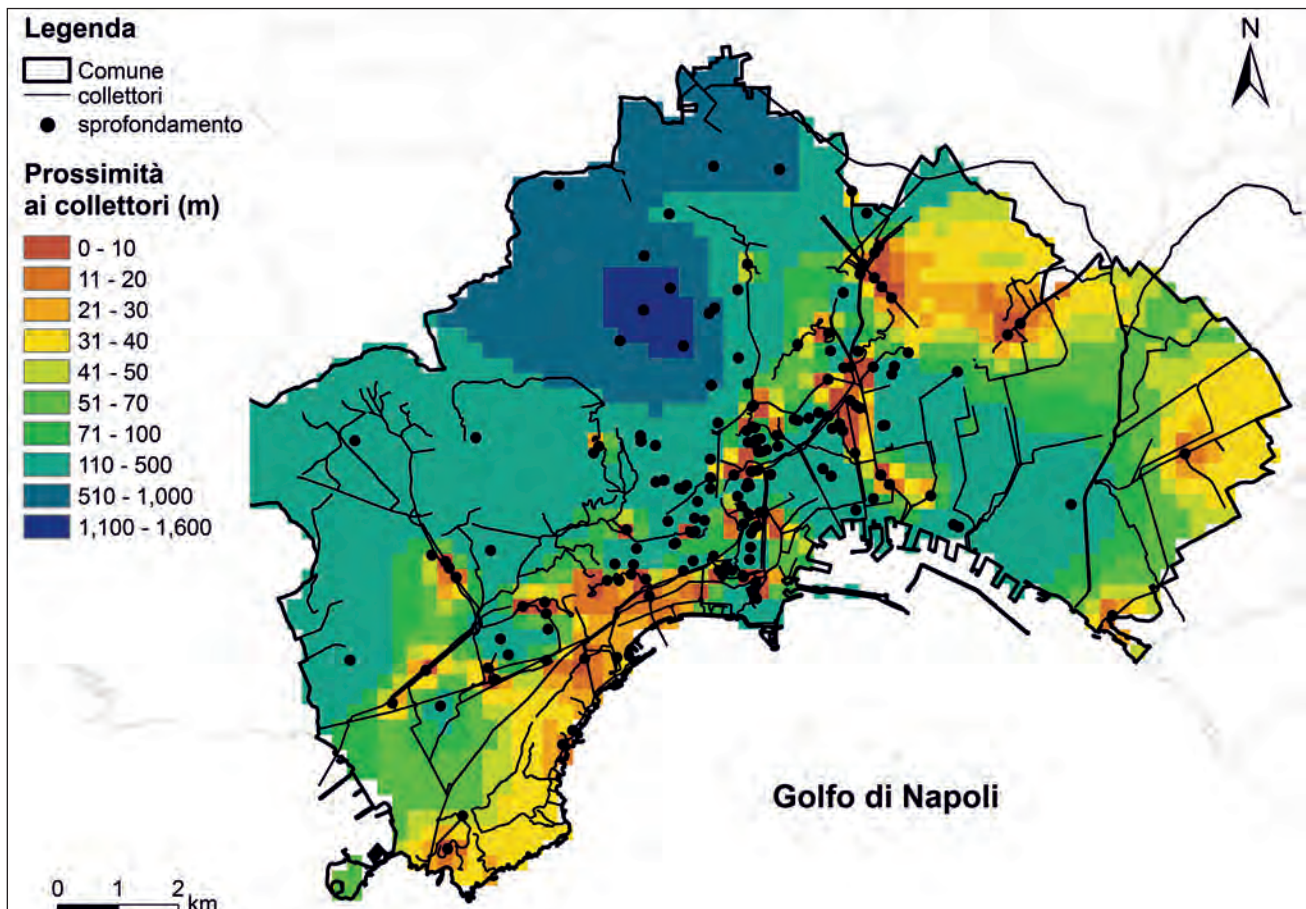


Fig. 22 – Mappa di prossimità dello sprofondamento ai collettori fognari.
 – Map of the proximity of the sinkholes from sewer network.

tipologia: continua o discreta; nel caso delle variabili continue viene determinato un coefficiente per ciascun fattore; nel caso, invece, delle variabili categoriali vengono determinati per ogni fattore tanti coefficienti quante sono le classi. In questo caso specifico tutte le variabili considerate sono state inserite nel foglio di input come variabili categoriche ordinali (es. 1, 2, 3, ecc.) il cui valore numerico della classe è maggiore quanto più la variabile predispone il fenomeno. I valori delle variabili indipendenti (fattori predisponenti) e della variabile dipendente (presenza/assenza sprofondamento) sono stati ottenuti estraendo il centroide delle celle raster relative ai singoli strati informativi. Il campione è stato poi depurato dai valori nulli, ed è stato suddiviso in due sottocampioni (dati di *training* e dati di *test*), tramite estrazione casuale, in maniera da avere un numero equilibrato di celle con presenza di evento rispetto al numero di celle senza evento.

6.3. - STUDIO PRELIMINARE DI OGNI VARIABILE

Le variabili esplicative (fattori condizionanti) tutte classificate come variabili ordinali, dove la classe con valore più basso si riferisce ad una condizione di “rischio minore”, sono state trasformate in variabili *dummy* in quanto uno degli assunti di base della regressione logistica è quello di relazione lineare fra $\text{logit}(\pi)$ ed il predittore (CIOTOLI *et alii*, questo volume). Per verificare la congruenza delle classi si è proceduto nel seguente modo:

- a) si ordinano le unità secondo le modalità assunte da una data variabile (es. secondo le 5 classi della variabile litologia);
- b) si creano delle variabili *dummy* in corrispondenza di ogni classe;
- c) si esegue la regressione logistica ponendo in relazione la variabile risposta con le variabili *dummy* e si rappresenta il valore del logit su un diagramma cartesiano in relazione ad un numero totale di

punti (tanti quante sono le classi) equispaziati in ascissa. L'unione con una spezzata dei punti dà l'idea della relazione fra il *logit* e la variabile predittiva. Se la spezzata è rettilinea si ha indicazione che esiste una relazione lineare tra il *logit* e la variabile predittiva, se la spezzata è discontinua è necessario modificare il numero di classi (in genere diminuirle) rispetto a quelle formate in prima istanza o, addirittura, dicotomizzare la variabile.

Di seguito sono riportati i risultati della verifica di congruenza delle classi per ogni fattore predisponente. La tabella 1 riporta la stima dei coefficienti β relativi ad ogni classe per tutte le variabili considerate; in grassetto sono evidenziati i coefficienti delle classi che non mostrano linearità. Se la classificazione adottata è congruente con il fenomeno i coefficienti devono diminuire al diminuire della classe.

6.3.1. - Rete dei Collettori Fognari (SEWER) (6 classi da 1 a 6)

Il *logit* e la variabile sono legati da una relazione lineare (vedi la stima dei coefficienti in tabella 1 e figura 23 a), pertanto sarà confermata la suddivisione in 6 classi.

6.3.2. - Permeabilità dei litotipi affioranti (PERM)

Il *logit* e la variabile non sono legate da una relazione lineare (tab. 1 coefficienti in grassetto, fig. 23 b). La riduzione delle classi da 5 a 3 non contribuisce alla linearizzazione. Perciò la variabile sarà considerata dicotomica (0 in corrispondenza della classe 1; 1 in corrispondenza delle classi da 2 a 5).

L'analisi della variabile "Permeabilità" considerata dicotomica ha prodotto i risultati riportati nella tabella 2.

Tab. 2 – Tabella di contingenza presenza / assenza di sprofondamenti vs variabile permeabilità suddivisa in due classi. La tabella permette di valutare la sensibilità e la specificità della regressione.

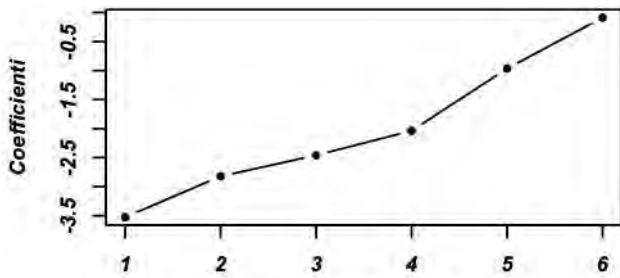
- Contingency table presence/absence of sinkhole vs permeability that it is divided into two classes. The table allows to evaluate the sensitivity and specificity of the regression.

		SINK		
		1	0	Tot
PERM	1	72	757	829
	0	66	1009	1075
	Tot	138	1766	1904

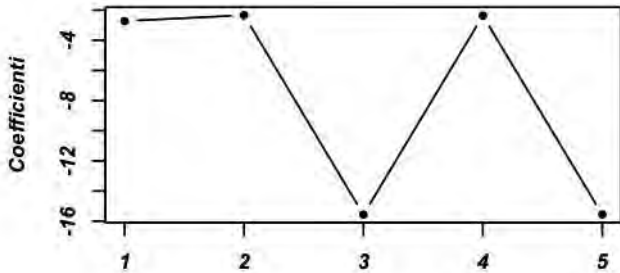
Tab. 1 - Stima dei coefficienti β relativi ad ogni classe per tutte le variabili considerate; in grassetto sono evidenziati i coefficienti delle classi che non mostrano linearità.

- Beta coefficients calculated for each class within the considered variables. Coefficients of the classes that show a linear pattern are highlighted in bold.

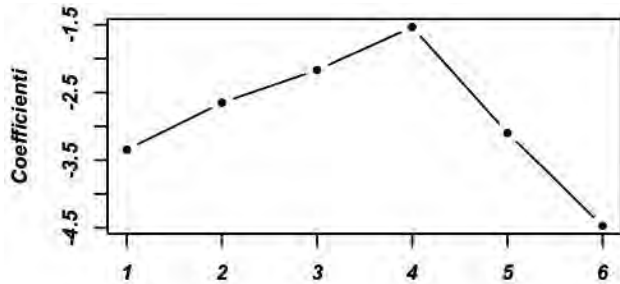
Variabili esplicative ("Layers")					
Classi	β Coeff. "Lito"	β Coeff. "Depth"	β Coeff. "Piezo"	β Coeff. "Perm"	β Coeff. "Sewer"
1	-16.56607	-3.3763	-3.3455	-2.7271	-3.52636
2	-3.96609	-2.6298	-2.6516	-2.3339	-2.82212
3	-3.45526	-1.9896	-2.1684	-15.5661	-2.45982
4	-2.67906	-2.8195	-1.5339	-2.3671	-2.03688
5	-2.15259	-2.0794	-3.0982	-15.5661	-0.96508
6			-4.4697		-0.08701



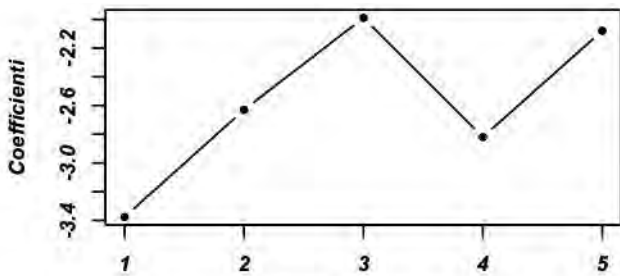
a) Rete dei sottoservizi



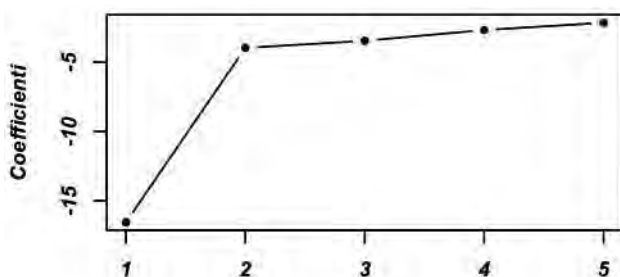
b) Permeabilità



c) Soggiacenza



d) Profondità del substrato



e) Litologia

Fig. 23 – Grafici per la valutazione della linearità dei coefficienti in relazione alle classi di “rischio” per ogni fattore predisponente.

– Scatterplots of the regression coefficient vs classes of “risk” for each of the conditioning factors.

Il rischio relativo dato dal rapporto fra il rischio associato al gruppo di unità caratterizzato da $PERM=1$ ed il rischio del gruppo con $PERM=0$:

$$R_{1/0} = \left(\frac{72}{138}\right) \left(\frac{757}{1766}\right) = 1.217$$

Tale quantità è sempre positiva. Assume valore 1 nell’ipotesi nulla di equilibrio nel rischio fra i due gruppi posti a confronto; tende a valori tanto più grandi di 1 quanto più il rischio del gruppo $PERM=1$ è superiore al gruppo $PERM=0$; è inferiore a 1 se il fattore $PERM$ è “protettivo” contro il rischio di sprofondamento.

La sensibilità ossia la proporzione di sprofondamenti diagnosticati correttamente dal fattore di rischio è data da:

$$Sen = \frac{72}{138} = 0.51$$

La specificità, ossia la proporzione di “assenza di sprofondamenti” correttamente diagnosticati è:

$$Spe = \frac{1009}{1766} = 0.57$$

6.3.3. - Litologia (LITO) (classi da 1 a 5)

La litologia ed il *logit* sono legate da relazione lineare, pertanto sarà mantenuta la classificazione in 5 classi litologiche (fig. 23 e).

6.3.4. - Profondità del substrato (DEPTH) (5 classi da 1 a 5)

Il *logit* e la variabile DEPTH non sono legate da una relazione lineare (tabella 1, coefficienti in grassetto e figura 23 d). Il numero delle classi è stato ridotto a 3 (1 corrispondente alla classe 1; 2 corrispondente alla classe 2; 3 corrispondente alle classi da 3 a 5). In questo modo la linearità viene garantita (la verifica è stata effettuata su 3 nuove *dummy variables*).

6.3.5. - Livello piezometrico (PIEZO) (6 classi da 1 a 6)

La variabile ed il *logit* non sono legati da una relazione lineare (tabella 1, coefficienti in grassetto e figura 23 c). Le classi sono state ridotte a 3 (1 corrispondente alla classe 1; 2 corrispondente alla classe 2; e 3 corrispondente alle classi da 3 a 6) per cui garantiscono la linearità fra la variabile ed il *logit*.

6.3.6. - Presenza di cavità nel sottosuolo (CAVITIES) (Variabile dicotomica)

Questo fattore è stato distinto in 2 classi tipo presenza/assenza (1/0). L'analisi della variabile "CAVITIES" considerata dicotomica ha prodotto i risultati riportati nella tabella 3.

Tab. 3 – Tabella di contingenza presenza / assenza di sprofondamenti vs variabile cavità suddivisa in due classi. La tabella permette di valutare la sensibilità e la specificità della regressione.

- Contingency table presence / absence of sinkhole vs cavity that it is divided into two classes. The table allows to evaluate the sensitivity and specificity of the regression.

		SINK		
		1	0	Tot
CAVITIES	1	63	155	218
	0	75	1611	1686
	Tot	138	1766	1904

Il rischio relativo dato dal rapporto fra rischio associato al gruppo di unità caratterizzato da CAVITIES=1 ed il rischio del gruppo con CAVITIES=0:

$$R_{1/0} = \left(\frac{63}{138} \right) \left(\frac{1766}{155} \right) = 5.2$$

Tale quantità è sempre positiva. Assume valore 1 nell'ipotesi nulla di equilibrio nel rischio fra i due gruppi posti a confronto; tende a valori tanto più grandi di 1 quanto più il rischio del gruppo CAVITIES =1 è superiore al gruppo CAVITIES =0; è inferiore a 1 se il fattore CAVITIES è "protettivo" contro il rischio di crolli.

La sensibilità ossia la proporzione di crolli diagnosticati correttamente dal fattore di rischio è data da:

$$Sen = \frac{63}{138} = 0.46$$

La specificità, ossia la proporzione di "non crolli" correttamente diagnosticati è:

$$Spe = \frac{1611}{1766} = 0.91$$

6.4. - SCELTA DEL MODELLO

Il modello logistico come qualunque altro modello regressivo tende a soddisfare i seguenti requisiti:

a) bontà di adattamento: i valori della variabile dipendente stimati devono essere vicini ai veri valori di Y, ossia l'errore di stima deve essere piccolo;

b) parsimonia: il numero dei predittori deve essere quanto più ridotto possibile, perché un numero elevato di predittori, oltre a rendere instabile il modello, lo rende difficilmente interpretabile;

c) capacità predittiva: il modello finale deve essere estensibile anche ad altri insiemi di dati, ovvero deve godere di una validità generale che ne permetta un ampio utilizzo.

Sono stati per questo, preliminarmente definiti 6 modelli in cui ciascun predittore è stato messo in relazione con la variabile crolli ciò allo scopo di verificare l'importanza e la capacità esplicativa di ciascuna variabile. Successivamente, sono stati costruiti modelli via via sempre più complessi fino a definire il modello che comprendeva le 6 variabili esplicative.

Il miglior modello incompleto (scelto sulla base dell'*Akaike information Criteria*) è stato, successivamente, confrontato con il modello completo mediante l'applicazione dell'ANOVA. Se l'extraevidenza (così è chiamato il *test*) è significativamente grande allora la scelta verterà sul modello completo mentre, se non risulterà significativa allora sarà scelto il modello ridotto.

Ai fini della discussione dei risultati saranno riportati solo i modelli definiti per ciascuna variabile esplicativa, il miglior modello ridotto, il modello completo e il *test* per la scelta fra questi ultimi.

6.5. - SEWER

Sia l'intercetta che il coefficiente sono significativi. In particolare, dal calcolo dell' $\exp(0.61444) = 1.85$ si evince che quando la variabile SEWER aumenta di una unità, il rischio di sprofondamento aumenta di circa il doppio (1.85). In generale, considerato un aumento di c unità della i-ma variabile indipendente il rischio associato sarà dato da $\exp(c\beta_i)$.

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.9607	-0.4213	-0.3130	-0.2315	2.6955

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-4.22037	0.22879	-18.45	<2e-16 ***
sewer	0.61444	0.06571	9.35	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 988.13 on 1890 degrees of freedom
Residual deviance: 896.18 on 1889 degrees of freedom
 AIC: 900.18

Da quanto detto si evince che:

chiamate con S_i le 6 classi associate alla variabile SEWER

a) l'aumento di una unità (essere nella classe S_2 invece che nella classe S_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di circa il doppio ($\exp(0.61444)=1.85$);

b) l'aumento di due unità (essere nella classe S_3 invece che nella classe S_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di oltre il triplo ($\exp(2*0.61444)=3.42$);

c) l'aumento di tre unità (essere nella classe S_4 invece che nella classe S_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di sei volte superiore ($\exp(3*0.61444)=6.32$);

d) l'aumento di quattro unità (essere nella classe S_5 invece che nella classe S_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di 12 volte superiore ($\exp(4*0.61444)=11.68$);

e) l'aumento di 5 unità (essere nella classe S_6 invece che nella classe S_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di 22 volte superiore ($\exp(5*0.61444)=21.6$).

6.6. - PERM

Sia l'intercetta che il coefficiente sono significativi. In particolare, dal calcolo dell' $\exp(0.3894)=1.47$ si evince che quando la variabile PERM aumenta di una unità (dalla permeabilità originariamente classificata in classe 1 - PERM=0 - alla permeabilità originariamente classificata nelle classi da 2 a 5 - PERM=1) il rischio di frana aumenta di circa di una volta e mezza.

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.4295	-0.4295	-0.3562	-0.3562	2.3620

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-2.7261	0.1271	-21.456	<2e-16 ***
perm	0.3894	0.1771	2.198	0.0279 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Null deviance: 988.13 on 1890 degrees of freedom
Residual deviance: 983.30 on 1889 degrees of freedom
 AIC: 987.3

6.7. - LITO

Sia l'intercetta che il coefficiente sono significativi. In particolare, dal calcolo dell' $\exp(0.6097)=1.89$ si evince che quando la variabile LITO aumenta di una unità il rischio di frana aumenta di circa il doppio (1.89). In generale, considerato un aumento di c unità della i -ma variabile indipendente il rischio associato sarà dato da $\exp(c\beta_i)$.

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.4704	-0.4704	-0.4704	-0.1929	2.8261

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-5.1942	0.4974	-10.442	< 2e-16 ***
lito	0.6097	0.1055	5.777	7.6e-09 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Null deviance: 988.13 on 1890 degrees of freedom
Residual deviance: 939.26 on 1889 degrees of freedom
 AIC: 943.26

Da quanto detto si evince che:

chiamate con L_i le 5 classi associate alla variabile LITO

a) l'aumento di una unità (essere nella classe L_2 invece che nella classe L_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di circa il doppio ($\exp(0.6097)=1.89$);

b) l'aumento di due unità (essere nella classe L_3 invece che nella classe L_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di oltre il triplo ($\exp(2*0.6097)=3.86$);

c) l'aumento di tre unità (essere nella classe L_4 invece che nella classe L_1 ad esempio) comporta

un rischio di crollo di sei volte superiore ($\exp(4 \cdot 0.6097) = 6.23$;

d) l'aumento di quattro unità (essere nella classe L_5 invece che nella classe L_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di 11 volte superiore ($\exp(5 \cdot 0.6097) = 11.5$).

6.8. - DEPTH

Sia l'intercetta che il coefficiente sono significativi. In particolare, dal calcolo dell' $\exp(0.5751) = 1.78$ si evince che quando la variabile DEPTH aumenta di una unità il rischio di frana aumenta di circa il doppio (1.78). In generale, considerato un aumento di c unità della i -ma variabile indipendente il rischio associato sarà dato da $\exp(c\beta_j)$.

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.4692	-0.4692	-0.3561	-0.2690	2.5836

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-3.8763	0.3075	-12.605	< 2e-16 ***
depth	0.5751	0.1188	4.842	1.28e-06 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

(Dispersion parameter for binomial family taken to be 1)

Null deviance: 988.13 on 1890 degrees of freedom
Residual deviance: 961.63 on 1889 degrees of freedom
 AIC: 965.63

Da quanto detto si evince che:

chiamate con D_i le 3 classi associate alla variabile DEPTH

a) l'aumento di una unità (essere nella classe D_2 invece che nella classe D_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di circa il doppio ($\exp(0.5751) = 1.78$);

b) l'aumento di due unità (essere nella classe D_3 invece che nella classe D_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di oltre il triplo ($\exp(2 \cdot 0.5751) = 3.15$).

6.9. - PIEZO

Sia l'intercetta che il coefficiente sono significativi. In particolare, dal calcolo dell' $\exp(0.3687) = 1.45$ si evince che quando la variabile

PIEZO aumenta di una unità il rischio di frana aumenta di circa di una volta e mezza (1.45). In generale, considerato un aumento di c unità della i -ma variabile indipendente il rischio associato sarà dato da $\exp(c\beta_j)$.

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.4111	-0.4111	-0.4111	-0.3440	2.5327

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-3.5348	0.4379	-8.073	6.87e-16 ***
piezo	0.3687	0.1557	2.368	0.0179 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Null deviance: 988.13 on 1890 degrees of freedom
Residual deviance: 981.69 on 1889 degrees of freedom
 AIC: 985.69

Da quanto detto si evince che:

chiamate con P_i le 3 classi associate alla variabile PIEZO

a) l'aumento di una unità (essere nella classe P_2 invece che nella classe D_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di circa una volta e mezza ($\exp(0.3687) = 1.45$);

b) l'aumento di due unità (essere nella classe P_3 invece che nella classe P_1 ad esempio) comporta un rischio di crollo di oltre il doppio ($\exp(2 \cdot 0.3687) = 2.1$).

6.10. - CAVITIES

Sia l'intercetta che il coefficiente sono significativi. In particolare, dal calcolo dell' $\exp(2.1874) = 8.9$ si evince che quando la variabile CAVITIES aumenta di una unità (ossia è presente) il rischio di frana aumenta di circa 9 volte (8.9).

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.8351	-0.3025	-0.3025	-0.3025	2.4929

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-3.0615	0.1181	-25.92	< 2e-16 ***
cavities	2.1874	0.1909	11.46	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Null deviance: 988.13 on 1890 degrees of freedom
Residual deviance: 872.07 on 1889 degrees of freedom
 AIC: 876.07

Da quanto fin qui esposto e dal valore assunto dall' Akaike Information Criteria (AIC) si osserva che, in termini d'importanza, le variabili esplicative possono essere ordinate nel seguente modo:

- 1) CAVITIES AIC=876
- 2) SEWER AIC=918
- 3) LITO AIC=943
- 4) DEPTH AIC=965
- 5) PIEZO AIC=985
- 6) PERM AIC=987

Come già accennato in precedenza sono stati analizzati tutti i possibili modelli a due variabili (in numero di 15 $N!/[n!(N-n)!]$); a 3 variabili in numero di 20; a 4 variabili in numero di 15; a 5 variabili in numero di 6 ed il modello completo a 6 variabili.

Tra tutti i modelli parziali esaminati quello migliore è risultato il seguente:

MIGLIORE MODELLO PARZIALE

Deviance Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1.5439	-0.3474	-0.2518	-0.1780	3.1625

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-7.33916	0.73415	-9.997	< 2e-16 ***
sewer	0.54345	0.06819	7.970	1.59e-15 ***
lito	0.41495	0.11483	3.613	0.000302 ***
cavities	1.54811	0.21299	7.268	3.64e-13 ***
piezo	0.42850	0.18262	2.346	0.018955 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Null deviance: 988.13 on 1890 degrees of freedom

Residual deviance: 789.17 on 1886 degrees of freedom

AIC: 799.17

Che, confrontato con il modello completo mediante analisi della varianza

MODELLO COMPLETO

Min	1Q	Median	3Q	Max
-1.5023	-0.3537	-0.2484	-0.1751	3.1843

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-7.48202	0.81012	-9.236	< 2e-16 ***
sewer	0.53104	0.07157	7.420	1.18e-13 ***
perm	0.12217	0.21608	0.565	0.571807
lito	0.42044	0.12046	3.490	0.000483 ***
depth	0.02288	0.15327	0.149	0.881325
cavities	1.52256	0.24062	6.328	2.49e-10 ***
piezo	0.44668	0.18697	2.389	0.016891 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Null deviance: 988.13 on 1890 degrees of freedom

Residual deviance: 788.85 on 1884 degrees of freedom

AIC: 802.85

Il valore del test AIC è più piccolo quindi fra i due modelli è da preferire il modello ridotto.

Pertanto il modello finale è:

$$SINK=7.33916+SEWER*0.54345+LITO*0.41495+CAVITIES*1.54811+PIEZO*0.4285$$

Il caso più sfavorevole (zona più suscettibile allo sprofondamento) è dato dai seguenti parametri:

$$CAVITIES=1 - SEWER=6 - LITO=5 - PIEZO=3$$

per cui $SINK=0.8299$

$$p = \frac{e^{\sin k}}{1 + e^{\sin k}} = \frac{e^{0.8299}}{1 + e^{0.8299}} = 0.696 \approx 0.7$$

ossia la probabilità di crollo è del 70%.

Nel caso di

$$CAVITIES=0 - SEWER=6 - LITO=5 - PIEZO=3,$$

allora $SINK=-0.71821$ e $p=0.33$ ossia la probabilità di rischio si dimezza (33%).

Nel caso di

$$CAVITIES=1 - SEWER=6 - LITO=1 - PIEZO=3$$

la probabilità di rischio rimane al 30% ($SINK=-0.8299$ $p=0.30$) mentre se nel caso $CAVITIES=1 - SEWER=6 - LITO=5 - PIEZO=1$ la probabilità di crollo sale al 49.3% ($SINK=-0.00271$ $p=0.4932$).

Applicando i coefficienti del modello logistico elaborato ai *layers* di tipo *raster* relativi ai fattori predisponenti considerati nello modello è stata elaborata una mappa di suscettibilità allo sprofondamento per l'area del Comune di Napoli (fig. 24). Inoltre, applicando l'equazione per il calcolo della probabilità associata:

$$p = \frac{e^{\sin k}}{1 + e^{\sin k}}$$

È stato possibile elaborare una mappa della probabilità di sprofondamento, dove, come già detto, non viene considerato il fattore tempo (fig. 25).

7. - CONCLUSIONI

I fenomeni censiti nel territorio del comune di Napoli sono classificabili come *anthropogenic sinkhole* (NISIO & SALVATI, 2004; NISIO 2008); in essi lo sprofondamento è, per lo più, legato al crollo dei terreni costituenti la volta di cavità antropiche, innescato dalla infiltrazione concentrata di acque me-

- ESPOSITO C. (2009) - *Gli ipogei greci della Sanità*. Edizioni Oxiana, pp. 128, Napoli.
- ESPOSITO C. (2010) - *Le problematiche strutturali del sottosuolo di Napoli*. http://www.nisalfe.it/PAGINE/pagina_NAPOLI/sottosuolonapoli.pdf (10/10/2010)
- EVANGELISTA A., FEOLA A., FLORA A., LIRER S. & MAIORANO R.M.S. (2000) - *Numerical analysis of roof failure mechanisms in a soft rock*. International Symposium on Geotechnical and Geological Engineering, Melbourne.
- FASOLA U.M. (1975) - *Le Catacombe di S. Gennaro a Capodimonte*, Editalia, Roma.
- FORD D. & WILLIAMS P.W. (1989) - *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman, London.
- GALANTE G.A. (1895) - *Il Sepolcreto Greco ritrovato sotto il palazzo Di Donato in via Cristallini ai Vergini*. Tipografia della Regia Università, Napoli.
- GIULIVO I., DEL PRETE S., PICIOCCHI P., RUSSO N. & SANTO A. (2005) - *Storia della speleologia in Campania*. In: N. RUSSO, S. DEL PRETE, I. GIULIVO & A. SANTO (Eds), "*Grotte e speleologia della Campania*", Sellino (Ed.): 85-103, Avellino.
- GIUSTINIANI L. (1816) - *Memoria di uno scavamento di un Antico Sepolcreto Greco-romano*. Napoli.
- GRECO PONTELANDOLFO A. (1985) - *Gli ipogei funerari*. In: "*Napoli Antica*": pp. 283-287, Napoli.
- GUARINO P. M. & MINUTOLO V. (2010) - *Anthropogenic sinkholes: simulazione attraverso modellazione numerica dello sprofondamento prodotto in superficie dal collasso di una cavità: il caso della grotta di Cocceio (Campi Flegrei, Napoli)*. Atti 2° Workshop Int. "I sinkholes: gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato", pp. 767-776, Roma.
- GUARINO P.M. & NISIO S. (2012) - *Anthropogenic sinkholes in the territory of the city of Naples (Southern Italy)*. J. Phys. Chem. Earth 49 (2012).
- GUNN J. (2004) - *Encyclopedia of caves and karst science*. Fitzroy Dearborn - Taylor and Francis Group, New York.
- JENNINGS J.N. (1985) - *Karst geomorphology*. Kateprint Co. Ltd, Oxford.
- LOMBARDI G., FEOLA A. & MIRAGLINO P. (2010) - *Interventi per la mitigazione del rischio idrogeologico nella città di Napoli*, Geologi, 28: 7-17.
- MELISURGO G. (1889) - *Napoli sotterranea. Topografia della rete di canali di acqua profonda. Contributo allo studio del sottosuolo di Napoli*. Tip. Giannini e Figli, 44 pp., Napoli.
- MICCIO B. & POTENZA U. (1985) - *Napoli ed i suoi acquedotti*. Ed. fuori commercio, A.M.A.N., 150 pp., NAPOLI.
- MININ G., DE LUZIO E. & GUARINO P.M. (2010) - *Il recupero del percorso militare sotterraneo "Tunnel Borbonico" realizzato da Ferdinando II di Borbone (Napoli)*. SIGEA, Atti del Convegno "Studi ed interventi per il risanamento delle cavità antropiche e naturali, Altamura (Ba), 2010, (Geologia dell'Ambiente. Supplemento al n. 2/2013, in stampa).
- MONROE W.H. (1970) - *A glossary of karst terminology*. U.S. Geol. Surv. Water Sup.
- NICOTERA P. & LUCINI P. (1967) - *La costituzione geologica del sottosuolo di Napoli nei riguardi dei problemi tecnici*. Atti VIII Convegno di Geotecnica, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli.
- NISIO S. (2008) - *Natural phenomena of sinkhole in Italian plain areas*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., 85: pp. 475, Roma.
- NISIO S. & SALVATI R. (2004) - *Fenomeni di sprofondamento catastrofico. Proposta di classificazione applicata alla casistica italiana*. Atti 1° Workshop: Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio: 573-584, Roma.
- OLIVARES L. & PICARELLI L. (2001) - *Susceptibility of loose pyroclastic soils to static liquefaction. Some preliminary data*. In: M. KUHNE, H.E. EINSTEIN, E. KRAUTER, H. KLAPPERICH & R. POTTIER (Eds.), "*Int. Conf. Landslides - Causes, countermeasures and impacts*". United Eng. Found. Inc, pp. 75-85, Davos.
- ORSI G., D'ANTONIO M., DE VITA A. & GALLO G. (1992) - *The Neapolitan Yellow Tuff, a large magnitude trachytic phreato-plinian eruption: eruptive dynamics, magma withdrawal and caldera collapse*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 53: 275-287
- ORSI G., DI VITO M. & ISAIA R. (Eds) (1998) - *Volcanic Hazard and Risk in the Parthenopean Megacity*. Field excursion guidebook. July 5-8, 1998. Osservatorio Vesuviano, Napoli.
- RASULO G. (2000) - *Il sistema fognario della città di Napoli alle soglie del 2000*. Arti Grafiche Solimene, pp. 133, Casoria (Napoli).
- RUGGIERO M. (1888) - *Degli scavi di antichità nelle province di terraferma dell'antico regno di Napoli dal 1743 al 1876*, Tipografia Vincenzo Morano, Napoli.
- STRAZZULLO F. (1966) - *Prammatiche per edilizia napoletana dal '500 al '700*. In: Ingegneri, 36: pp. 46.
- SWEETING M.M. (1972) - *Karst landform*. Macmillan, London.
- VECCHIO G. (1985) - *Gli ipogei funerari*. In: "*Napoli Antica*", pp. 287-292, Napoli.
- WALTHAM A. C. & FOOKERS P. G. (2003) - *Engineering classification of karst ground conditions*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 36: 101-118.
- WHITE W.B. (1988) - *Geomorphology and Hydrology of carbonate terrains*. University Press, Oxford.