

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base  
Università degli Studi di Napoli Federico II

Tesi di laurea triennale in  
Ingegneria per l'ambiente e il territorio  
**Valutazione della pericolosità e rischio da crollo delle cavità  
artificiali del Centro storico di Napoli (NA)**

Relatore:  
Prof. Paolo Budetta

Candidato:  
Davide Basso  
N49000198

Anno accademico 2016/2017

Le prime notizie sul sottosuolo napoletano sono riportate in un libro del 1889, scritto da G. Melisurgo, che ripercorse e descrisse il reticolo dell'acquedotto napoletano.

1884: Il Colera a Napoli



Dismissione dell'acquedotto a pelo libero e sostituzione con un nuovo acquedotto in pressione



Dissesti diffusi sul territorio

Anni '60: Speculazione edilizia e continui dissesti



Istituzione della prima commissione del Sottosuolo di Napoli.



Individuazione di 366 cavità:

- 203 Sedi di acquedotti
- 163 vuoti da sfruttamento

1998: Evento luttuoso Di Secondigliano



Stato di calamità e istituzione della commissione Di Governo per interventi di emergenza per il Consolidamento del sottosuolo

# Cavità artificiale

La cavità artificiale è un manufatto ottenuto attraverso l'asportazione, dal suolo e dal sottosuolo, di terreno o di roccia per ricavare un ambiente sotterraneo destinato a una specifica funzione.

- Può autosostenersi oppure essere dotata di strutture interne di contenimento, oppure portanti.
- Può essere rivestita parzialmente o completamente (con materiali tipo cocchiopesto, argilla, malta, legno, muratura).
- Possono essere ricavate sia al di sotto del piano di campagna, e quindi sotto il piano di calpestio, sia perforando i fianchi di rilievi collinari. Nel primo caso avrà l'accesso tramite pozzi (occhi di monte), nel secondo caso l'accesso sarà a raso.



## Scopi:

- Utilizzo come sede di acquedotti
- Opere di percorrenza
- Opere militari
- Interventi di consolidamento

Le cavità presenti nel sottosuolo della città di Napoli nascono per adempiere a necessità specifiche della popolazione e pertanto sono caratterizzate da tipologie particolari idonee all'uso per cui erano destinate.

- Greci e romani utilizzavano il T.G.N. come materiale da costruzione, date le ottime qualità di questo



- Acquedotto Bolla
- Acquedotto Augusteo (Ponti rossi)

- 1484, murazione della città Aragonense



- Anni della guerra



Utilizzo delle cave come ricoveri:

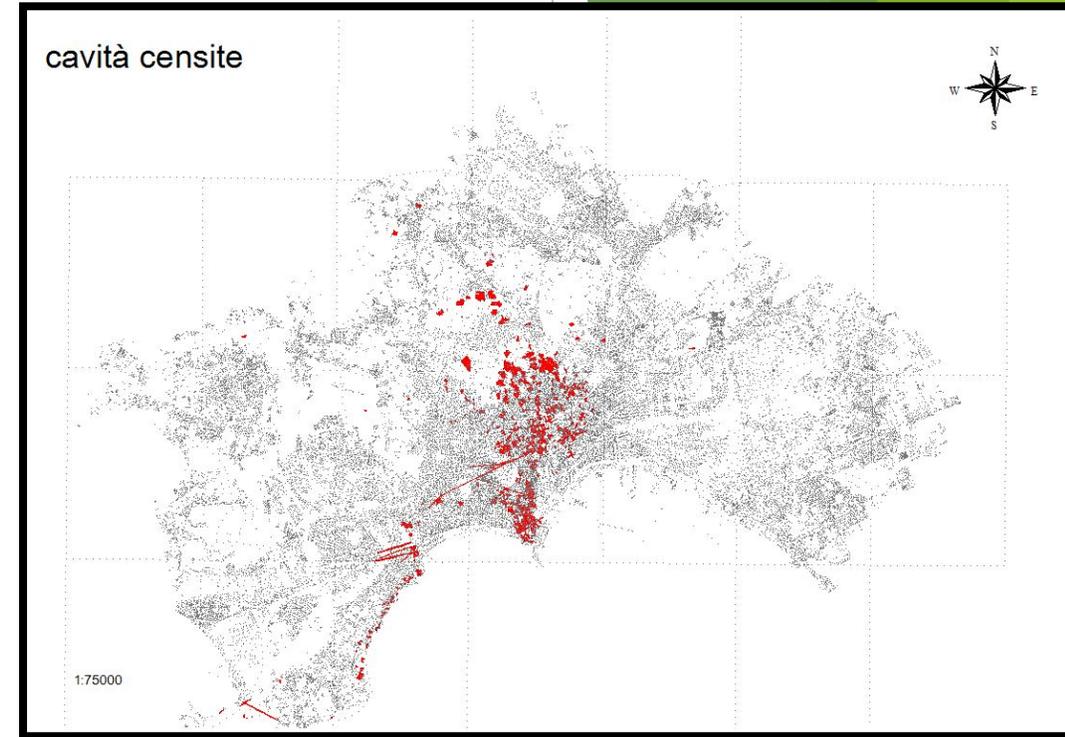
- 400 ricoveri
- 600 punti di accesso



# Distribuzione delle cavità artificiali sul territorio

Il maggior numero di cavità si trova nei quartieri più antichi:

- Reticoli di antichi acquedotti
- Tombe (zona di Materdei)
- Cimiteri cristiani (Capodimonte)



● 1980, vengono rilevate 250 cavità e 462 accessi

● 1988, vengono censite 461 cavità

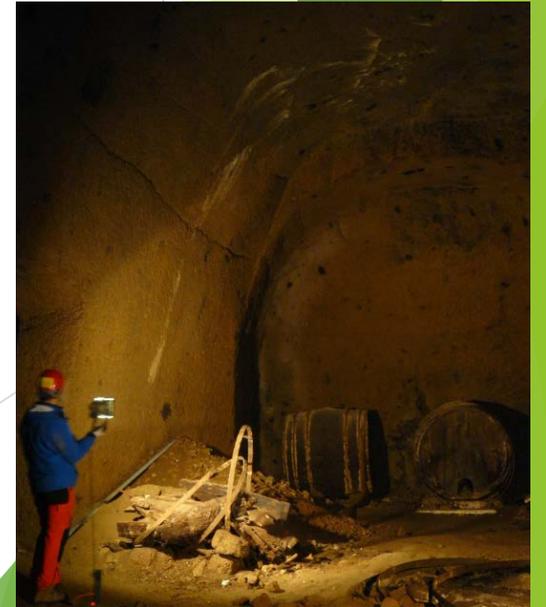
● 1997 - 1999, Acquisizione dei dati disponibili



- 461 cavità censite
- 131 di nuova rilevazione
- 141 non rilevate

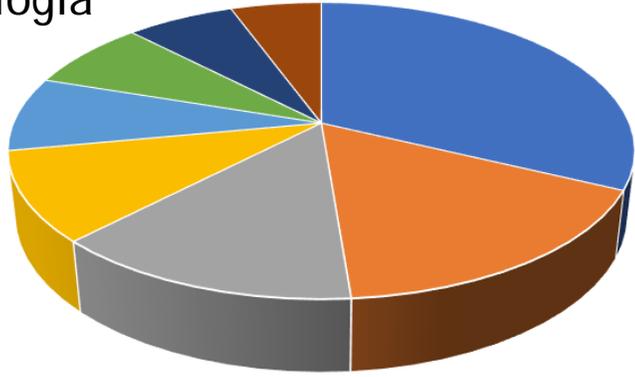
# Studio sulle stabilità

1. Regime idrico
2. Geometria delle costruzioni
3. Copertura della volta
4. Rilievo plano-altimetrico



# Dati su un campione di 554 cavità:

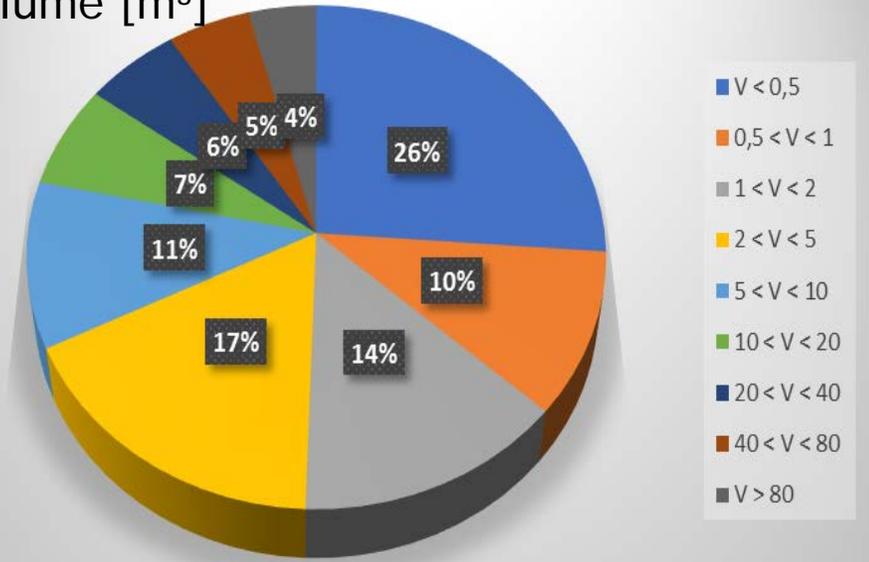
## Tipologia



■ Camera semplice  
■ Cisterna  
■ Non definibile  
■ Galleria  
■ Camera con pilastri  
■ Rete di gallerie

Tipologia più ricorrente è la camera semplice.

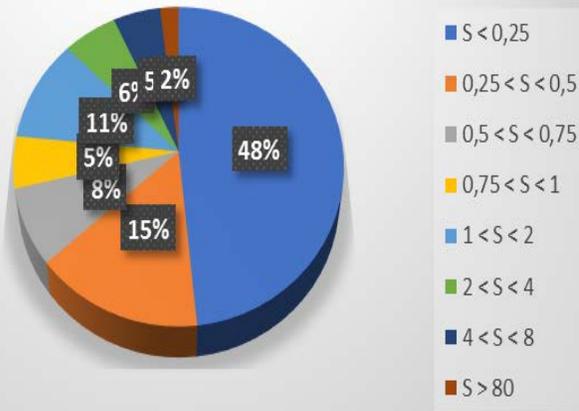
## Volume [m<sup>3</sup>]



■  $V < 0,5$   
■  $0,5 < V < 1$   
■  $1 < V < 2$   
■  $2 < V < 5$   
■  $5 < V < 10$   
■  $10 < V < 20$   
■  $20 < V < 40$   
■  $40 < V < 80$   
■  $V > 80$

La maggioranza delle cavità appartiene ai primi due intervalli, cioè si tratta di cavità con superficie  $S < 500 \text{ m}^2$ .

## Superficie [m<sup>2</sup>]

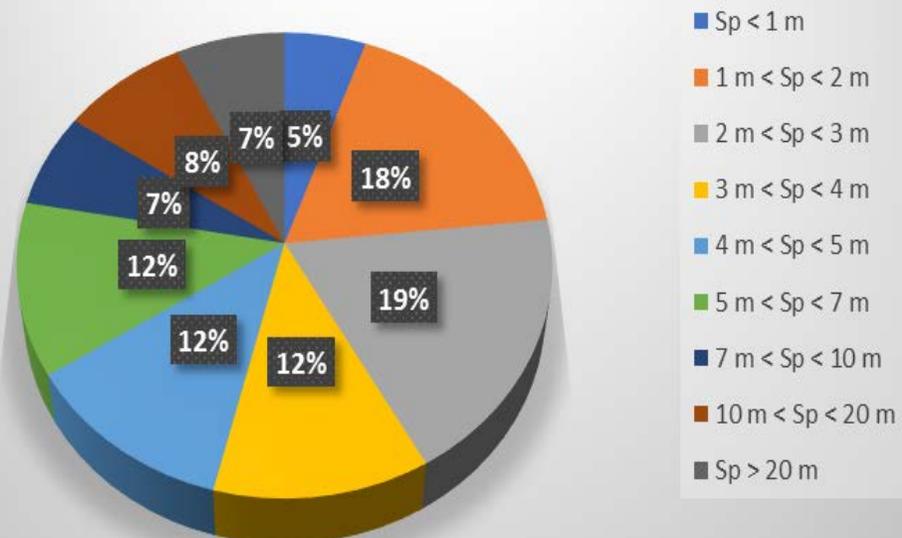


■  $S < 0,25$   
■  $0,25 < S < 0,5$   
■  $0,5 < S < 0,75$   
■  $0,75 < S < 1$   
■  $1 < S < 2$   
■  $2 < S < 4$   
■  $4 < S < 8$   
■  $S > 80$

La maggioranza delle cavità appartiene ai primi tre intervalli, cioè si tratta di cavità con volume  $V < 2000 \text{ m}^3$

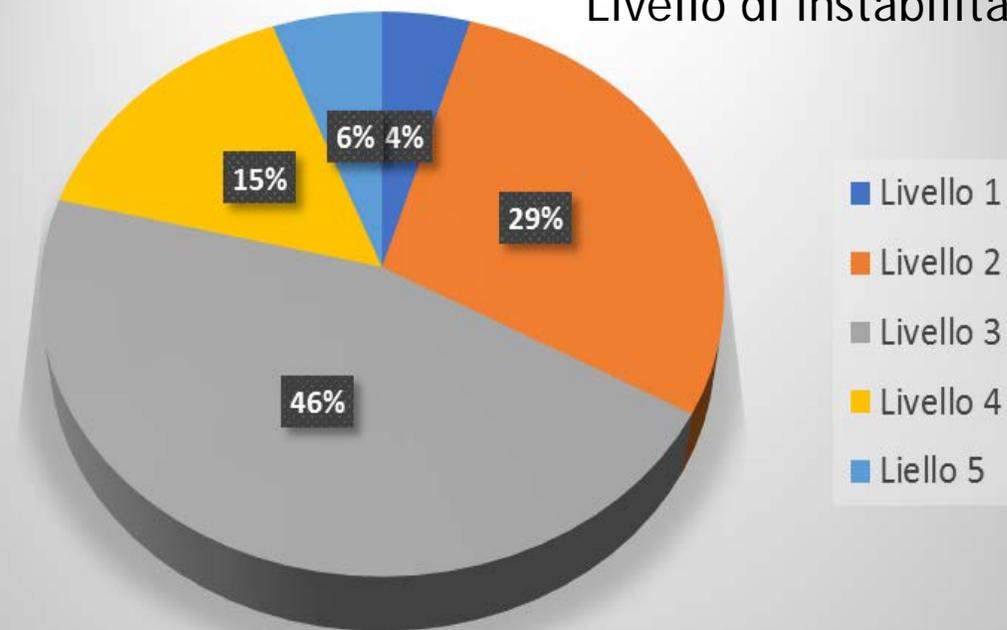
## Studio su un campione di 167 cavità:

Spessore in volta [m]



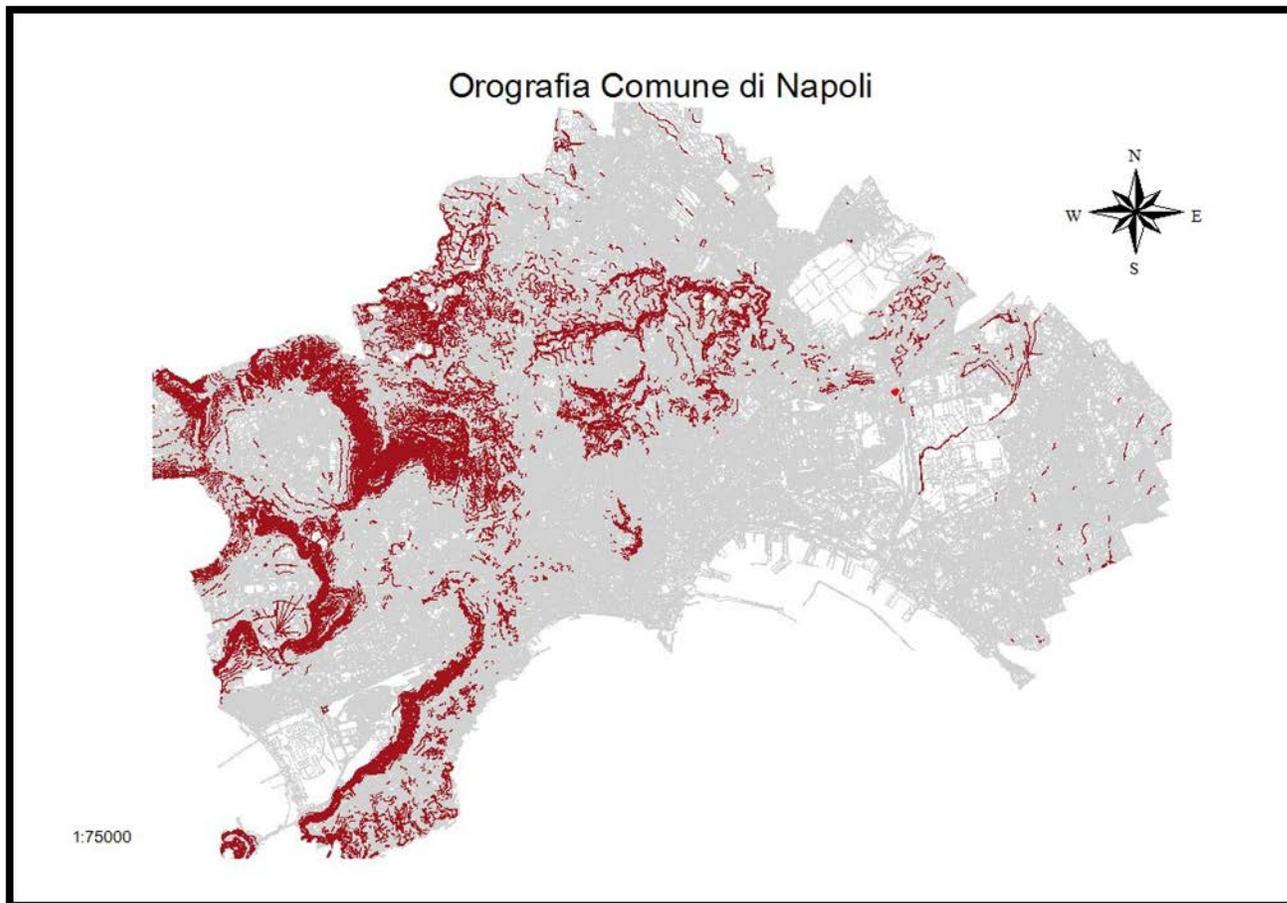
La maggioranza delle cavità è localizzata nel secondo, terzo, quarto e quinto intervallo cioè si tratta di cavità con  $1 \text{ m} < Sp < 5 \text{ m}$ .

Livello di instabilità



Instabilità crescente da 1 a 5

## Inquadramento geomorfologico del territorio napoletano



L'area metropolitana della città di Napoli è caratterizzata da una superficie di 117,27 Km<sup>2</sup> di cui 92,63 risultano urbanizzati.

Come è noto la morfologia della città si sviluppa ad anfiteatro:

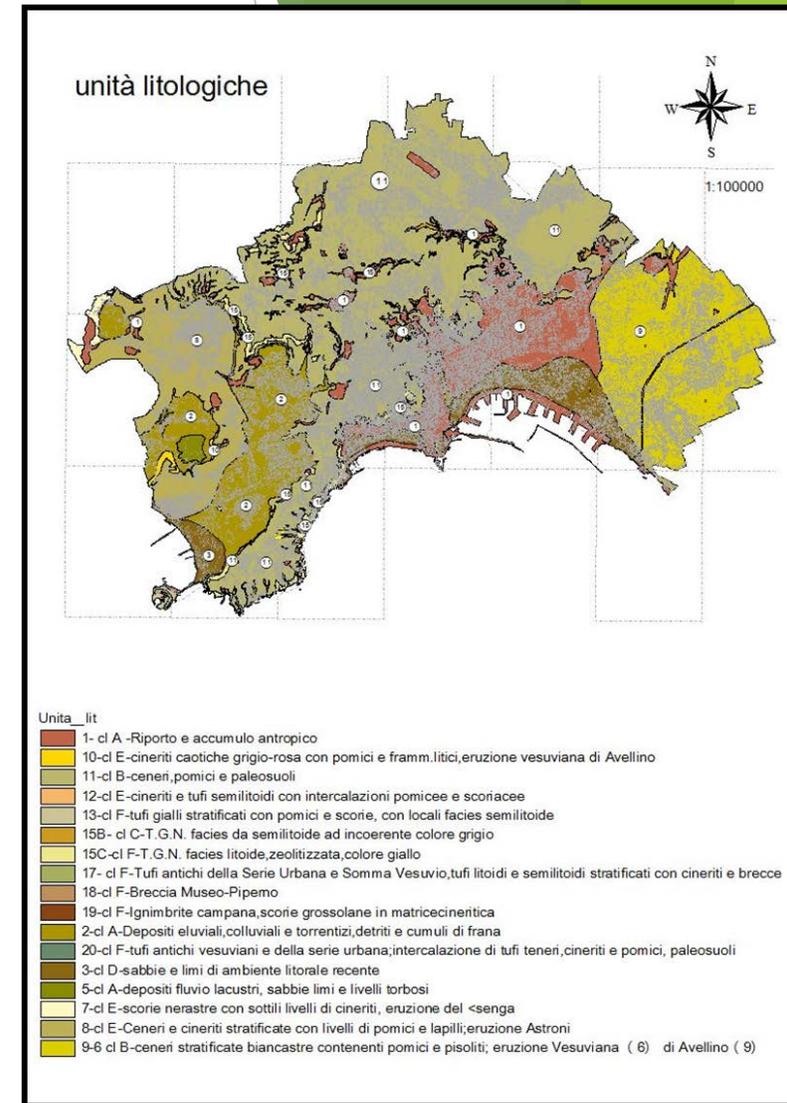
- dalla collina dei Camaldoli si passa, in direzione Sud-Est al pianoro del Vomero da cui si diparte un costone, prevalentemente tufaceo che va a costituire la collina di Posillipo.
- In direzione Nord-Est, partendo dalla culminazione dei Camaldoli, la morfologia degrada dolcemente terminando ad oriente nell'altra piana costiera.
- Le coste nel territorio comunale di Napoli sono basse. Fa eccezione la collina di Posillipo le cui coste, sono alte quasi 200 metri e costituite da tufo.

# Geologia e litologia

La città di Napoli nasce e si sviluppa tra i due grandi apparati vulcanici del Somma Vesuvio ad oriente e dei Campi Flegrei ad occidente ed il suo territorio è costituito dai prodotti vulcanici formati in tempi recentissimi.

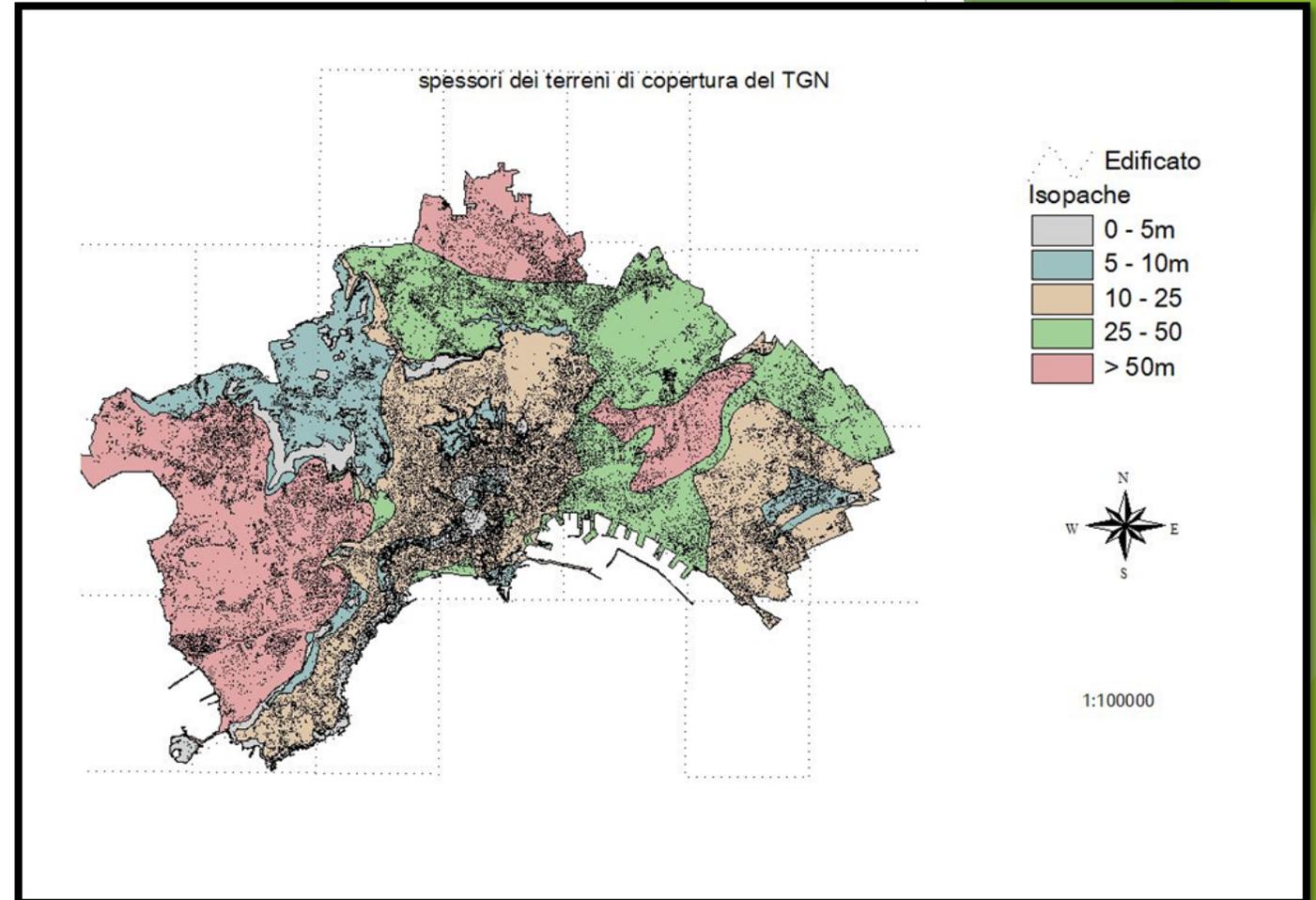
I terreni di affioramento sono distinti in 17 litotipi e a questi sono state assegnate 6 classi di resistenza crescente da A a F in base a prove penetrometriche CPT e SPT:

- A e B materiali con caratteristiche scadenti
- C materiali in facies semilitoide
- D sabbie e limi sepolti da depositi successivi
- E formazioni piroclastiche flegree
- F materiali litoidi



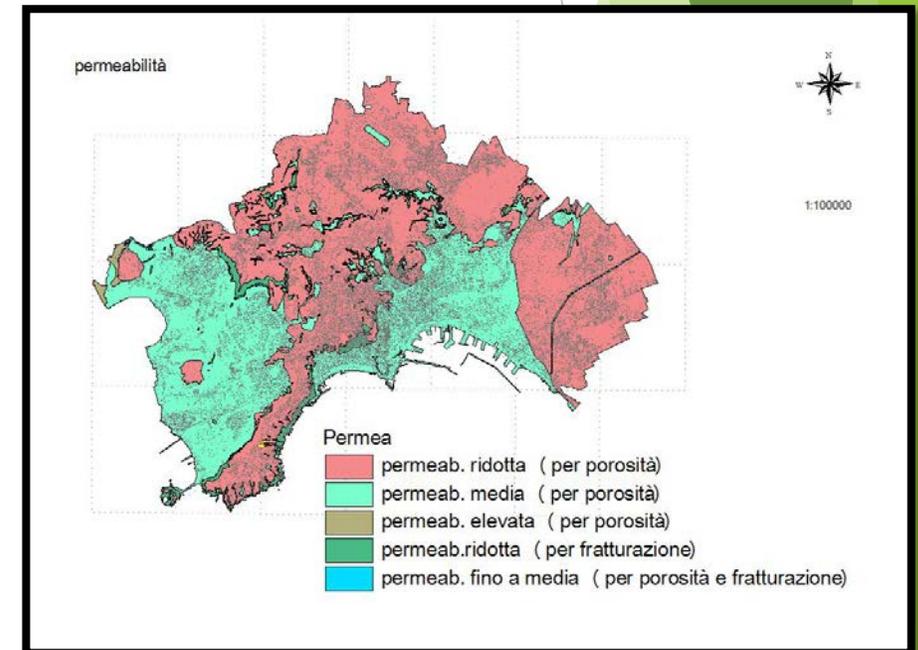
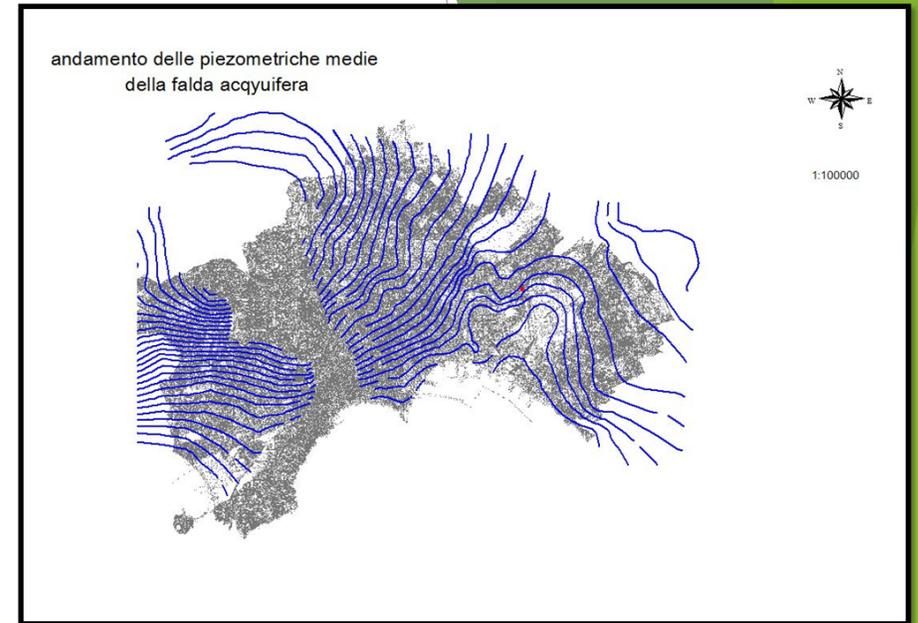
# Spessore dei terreni di copertura del tufo giallo

Conoscere lo spessore dei terreni di copertura del tufo giallo, consente di individuare l'altezza del rivestimento degli eventuali pozzi di accesso alle cavità presenti.



# Idrologologia

- Si rileva, in estrema sintesi, l'esistenza di due sistemi acquiferi principali, corrispondenti uno all'area Napoli-Volla e l'altro ai Campi Flegrei, separati da un'area di terreni poco permeabili.
- Occorre precisare comunque che nella serie dei prodotti vulcanici, dalle misure sperimentali fatte, il tufo giallo napoletano è il termine meno permeabile di tutta la serie, ove infatti la sua permeabilità è principalmente per fratturazione.



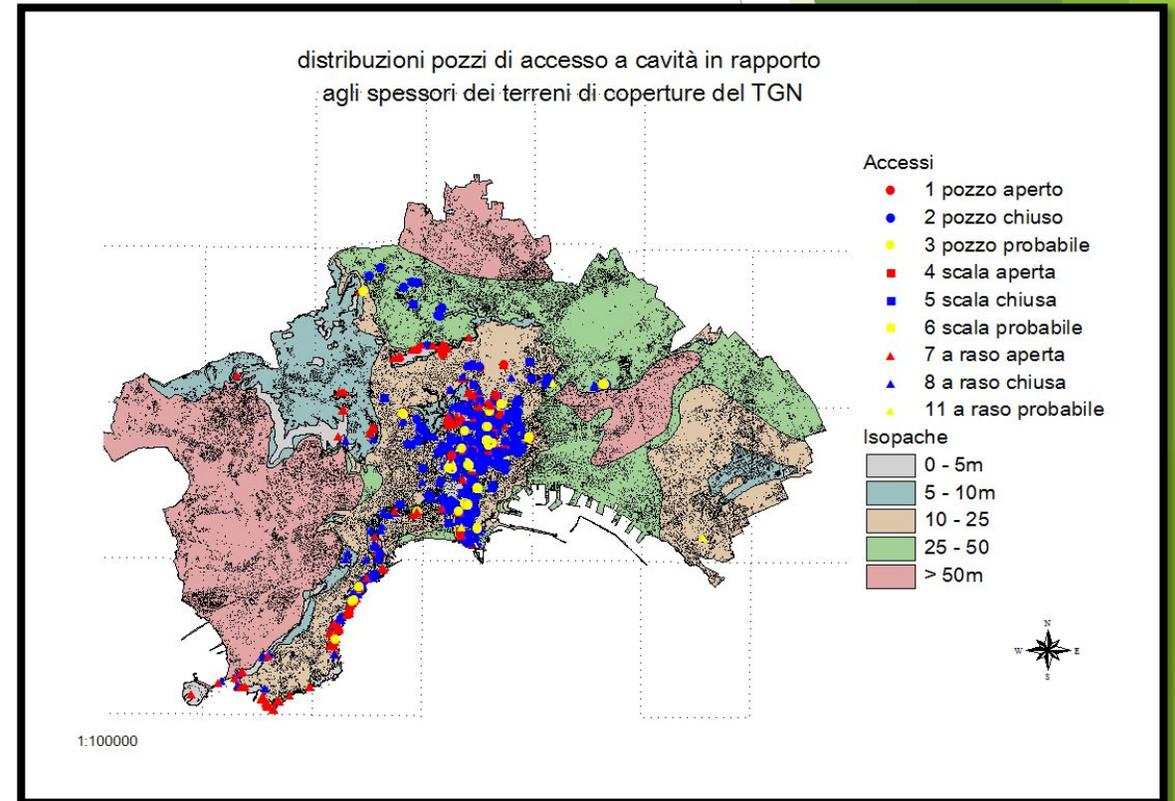
# Vulnerabilità del territorio in presenza di pozzi di accesso alle cavità

Il vero pericolo è però determinato dall'esistenza di antichi pozzi per l'approvvigionamento idrico degli edifici soprastanti

Per pozzi si intendono quei manufatti facente parte del sistema di distribuzione idrica del vecchio acquedotto a pelo libero "Claudio -Bolla - Carmignano", afferenti a cisterne o cunicoli e tali da permettere l'approvvigionamento idrico della antica città di Napoli.

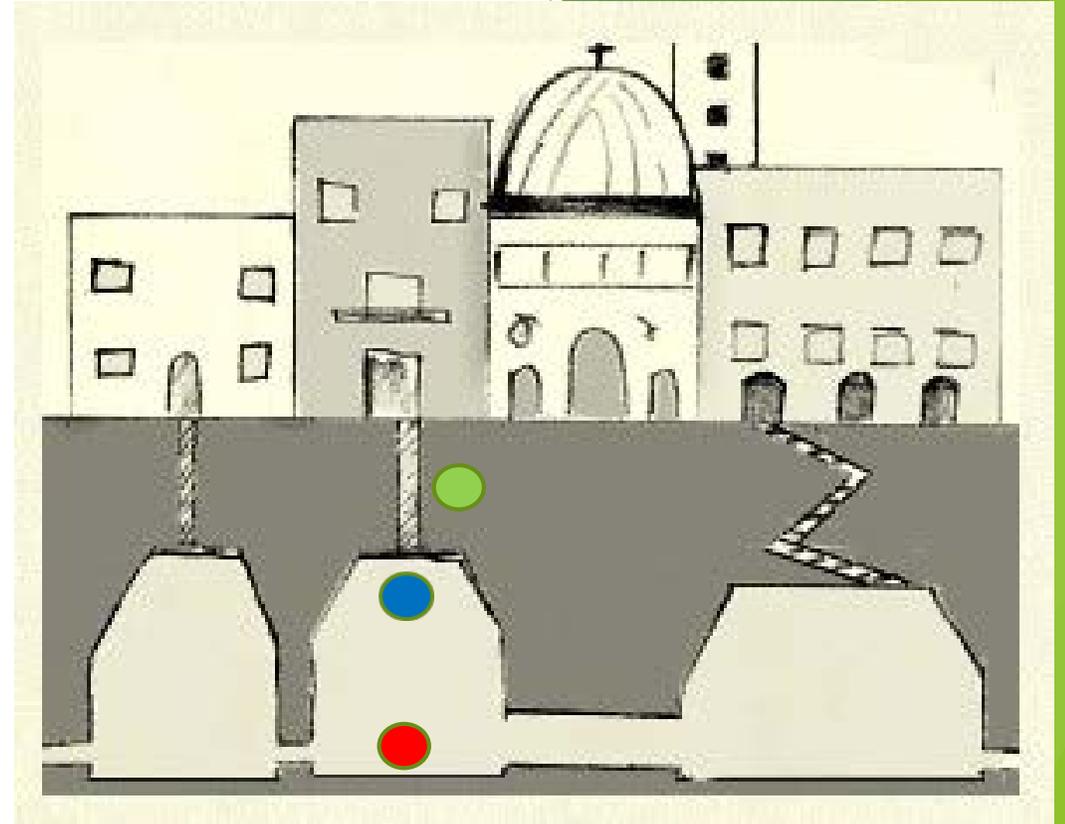
Sono stati censiti circa 1299 pozzi, classificati come accessi a cavità:

- pozzi aperti, quindi identificati precisamente
- pozzi chiusi, alcuni identificati e altri da accertare
- pozzi probabili, da accertare.

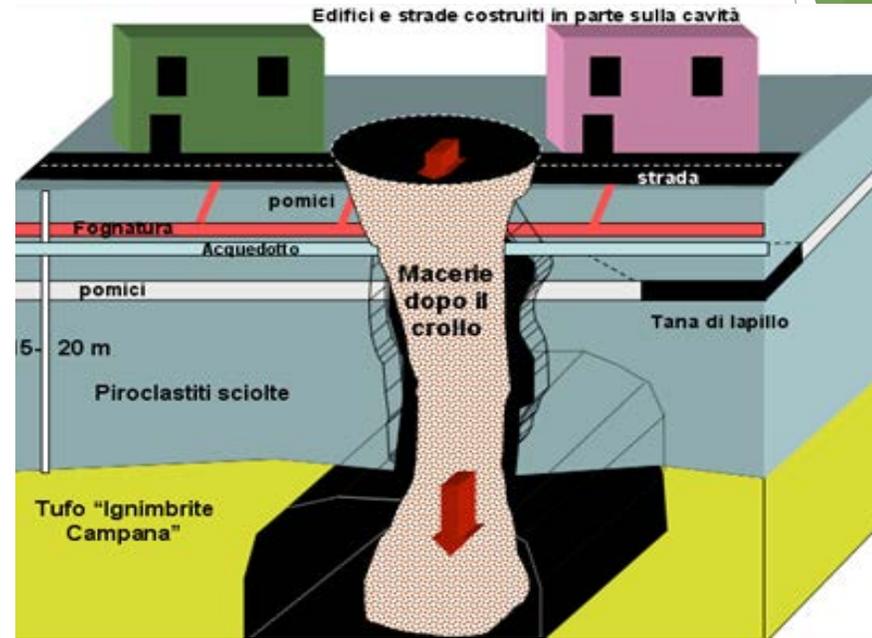
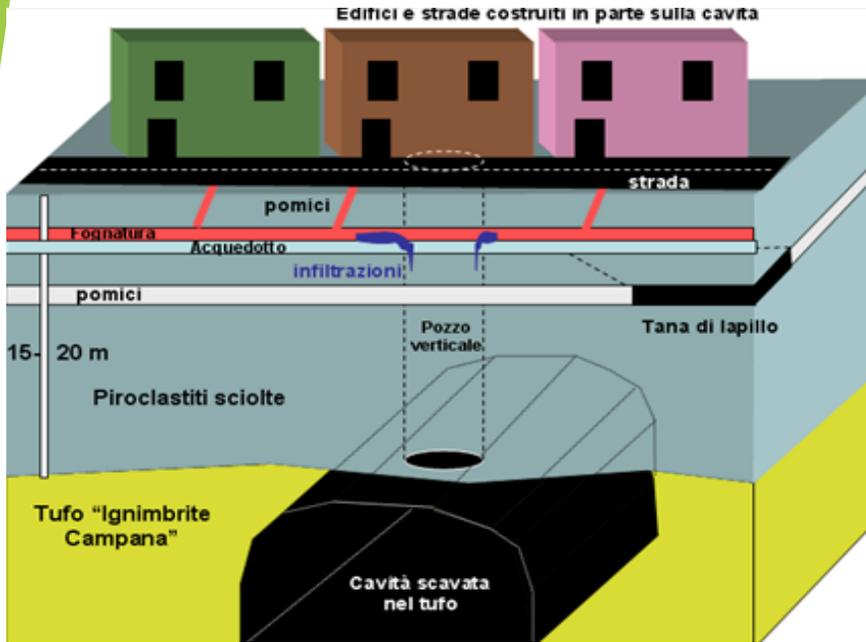


# I pozzi

- La vasca è cavata nel tufo a forma di prisma retto a base rettangolare o quadrata, col fondo leggermente concavo nel centro oppure inclinato verso un punto, in modo da agevolarne lo spurgo e la pulizia.
- Il diritto è il pozzo verticale che mette in comunicazione la vasca e la campana con la parte superiore a giorno, oppure ai diversi piani delle abitazioni dalle quali si esercitava l'attingimento dell'acqua.
- La campana è il vuoto che si trova superiormente alla vasca; la parte di tale vuoto corrispondente alla copertura che, più propriamente, si chiama cielo. La forma del cielo è a botte, a vela o a padiglione con quattro superfici cilindriche.



# Dinamica dei dissesti per crollo dei pozzi



La circolazione di acque libere nel sottosuolo provocano il cedimento del pozzo nella parte rivestita da conci di tufo.

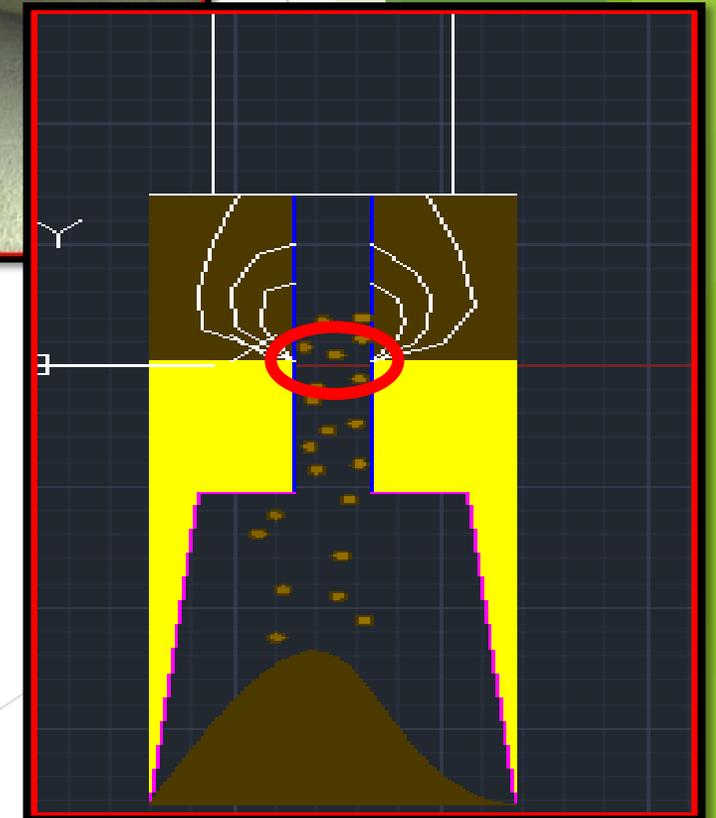
La cisterna sottostante funge da richiamo dei terreni, per cui al di sopra del tetto del tufo si forma un vuoto che si amplia procedendo dal basso verso l'alto; quando i terreni superficiali raggiungono il limite critico di resistenza si determina l'improvvisa apertura di una voragine tanto più ampia quanto più profondo è il rivestimento dissestato.

La voragine si evolve dal basso verso l'alto interessando un'area sempre più grande (ad imbuto) in tempi spesso lenti e progressivi.

# Tipologia di interventi di messa in sicurezza dei pozzi

Per la valutazione dell'intervento di messa in sicurezza dei pozzi, va valutato se il pozzo è l'unico accesso alla cavità:

- Intervento di consolidamento del manufatto (rivestimento con rete elettrosaldata; rivestimento delle pareti con muratura in cemento armato riducendo la sezione del pozzo) o l'intasamento dell'intera cavità e pozzo sovrastante mediante riempimento con cemento alleggerito
- Obliterare l'imbocco all'altezza del banco tufaceo con un solaio, operando dall'interno della cavità, e procedere successivamente all'intasamento del solo pozzo operando dall'esterno.



# Metodologie di indagine

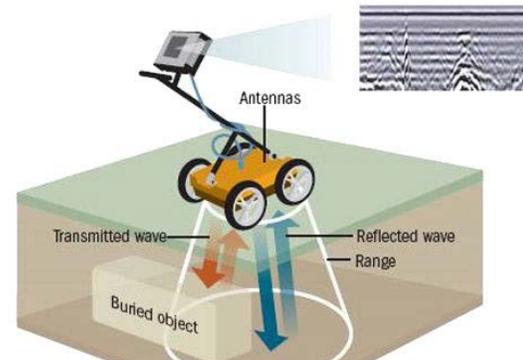
## Indagini dirette

- Sondaggi geognostici
- Prospezioni televisive in foro
- Rilievi speleologici



## Indagini indirette

- Metodo gravimetrico
- Metodo geoelettrico
- Georadar
- Metodo sismico



# Sondaggi geognostici

- ▶ A distruzione di nucleo

Permettono di individuare il tetto e il letto di un vuoto sotterraneo. Tale tecnica può risultare valida nel caso di una singola cavità ma non in presenza di una rete di cavità.

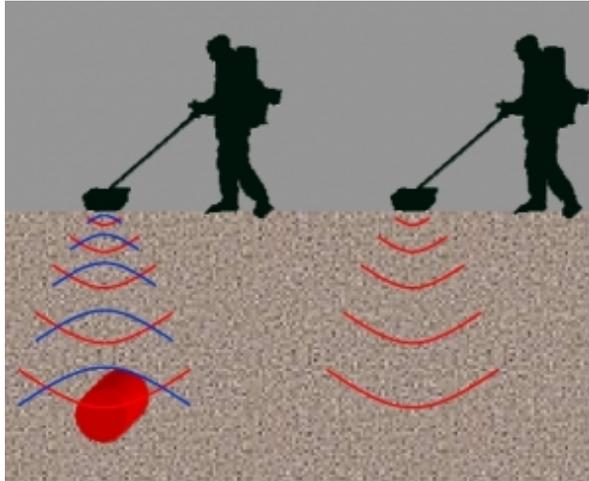
- ▶ A carotaggio continuo

consente sia di prelevare campioni di terreno, per poter ricostruire l'andamento stratigrafico del sottosuolo e per prove di laboratorio

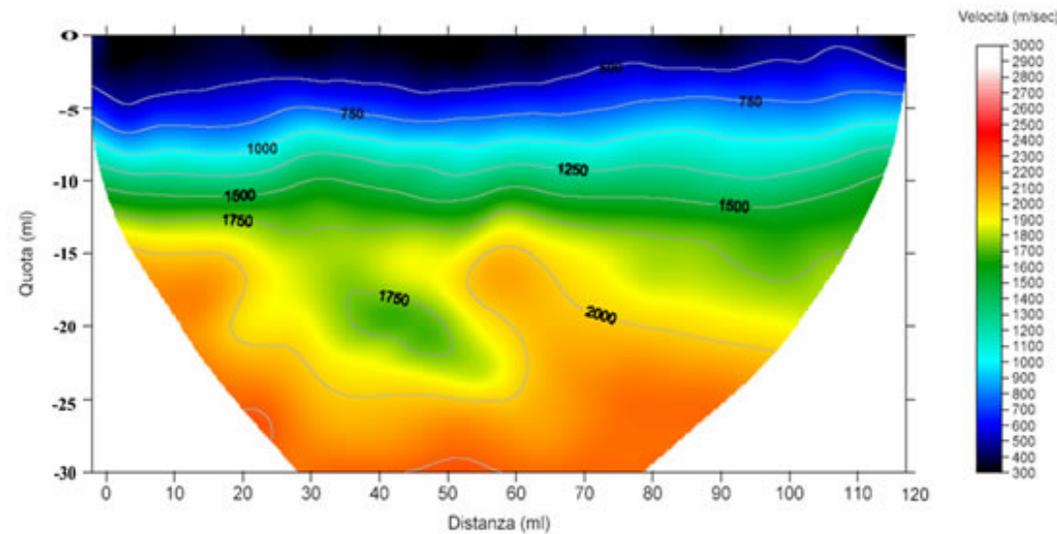


# Tecniche di rilievo geofisico

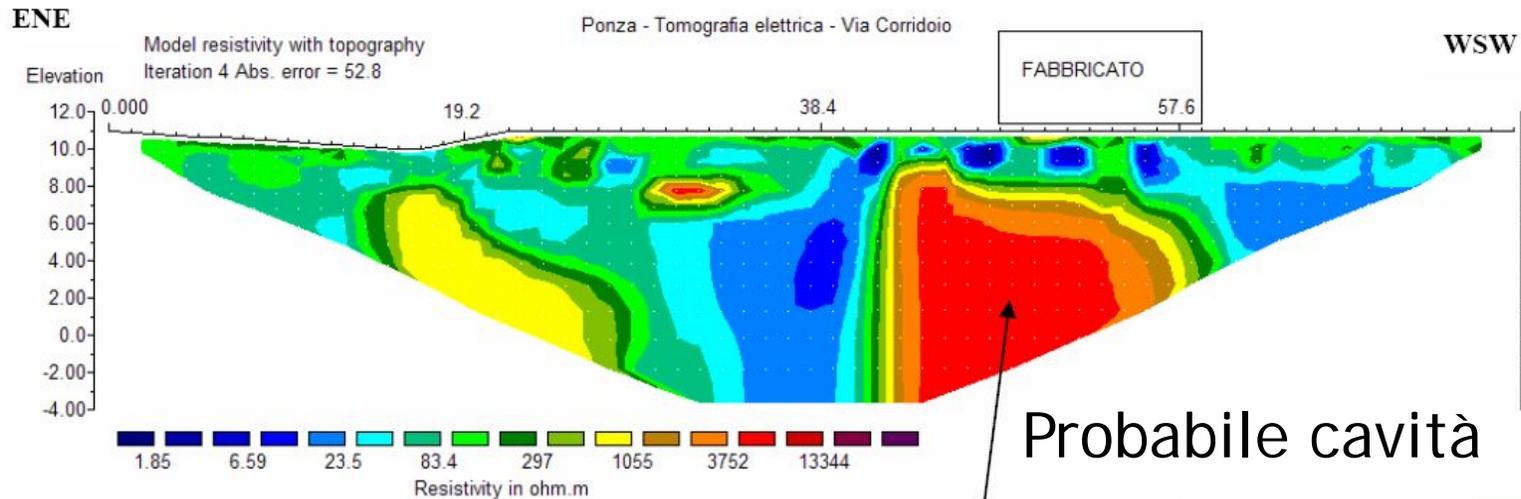
## Georadar



## Metodo sismico



## Tomografica geoelettrica



# Pericolosità e rischio

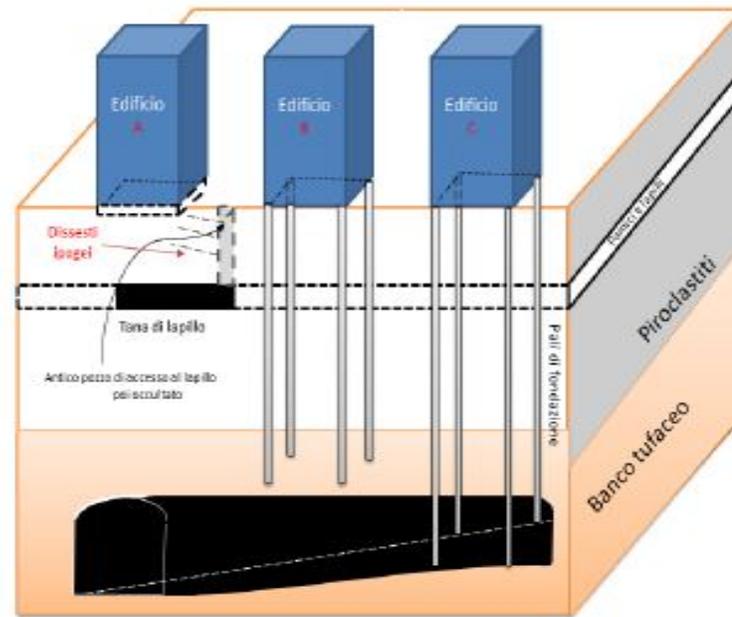
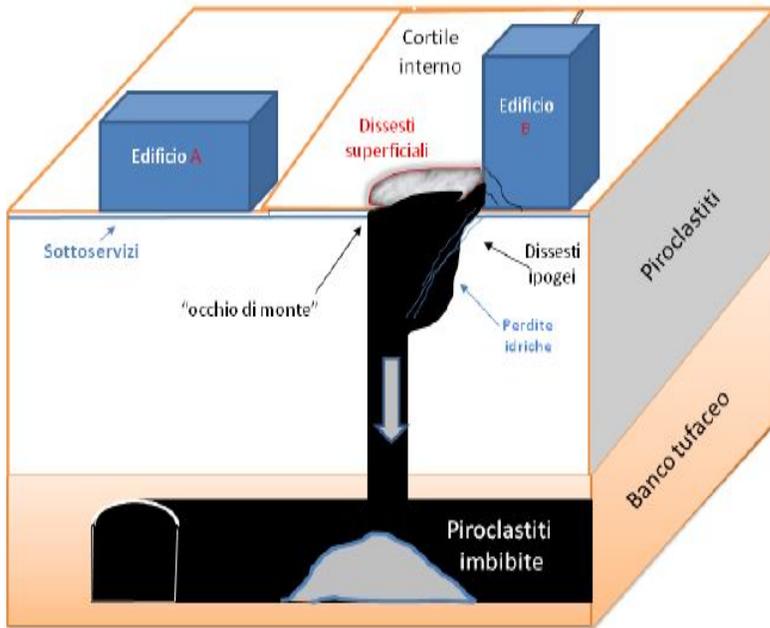
$$R = P \cdot E \cdot V$$

Nel caso della valutazione della pericolosità conseguente al crollo di una cavità sotterranea non è possibile eseguire valutazioni sui tempi di ritorno e quindi valutazioni probabilistiche sul verificarsi dell'evento in un determinato tempo  $t$ .

Pertanto, nel caso di rischio connesso alla presenza di cavità ipogee si passa dal concetto di pericolosità a quello di "*suscettibilità*" dove non è presente alcun termine probabilistico.

La suscettibilità al crollo coincide con il rischio assoluto che in un'area in un determinato periodo di tempo si determini una voragine; pertanto nelle aree dove sono presenti cavità ipogee è possibile definire una maggiore o minore *propensione* al verificarsi di una voragine e/o subsidenza per il crollo di una cavità sottostante

# Scenari di Rischio



La presenza di una miriade di cavità e di occhi di monte rappresentano un pericolo potenziale che molto spesso si traduce in dissesti, crolli e voragini. Tali forme di dissesto sono per lo più legate ad infiltrazioni e perdite delle reti idriche in pressione e fognarie.

Le infiltrazioni confluiscono verso le vie di minore resistenza idraulica, processi erosivi che ampliano progressivamente il foro, cui fa seguito generalmente il collasso delle volte delle cavità sottostanti e la formazione di ampie voragini ad imbuto che giungono sino alla superficie.

# Tecniche di intervento



**Rimozione preventiva:** un primo criterio consiste nel rimuovere preventivamente la fascia di terreni interessata dalle cavità.



Con le **fondazioni profonde**, ad esempio su pali, il problema viene superato trasferendo i carichi al di sotto delle cavità.



**Riempimento delle cavità:** soluzione, semplice ed intuitiva, ma presenta problemi di congruenza e continuità con i terreni preesistenti e quindi di scelta dei materiali di riempimento.



**Interventi di consolidamento:** consistono in interventi sistematici di sostegno delle volte, di rinforzo di colonne e pilastri e di consolidamento dei terreni intorno alle cavità.

# Conclusioni

Lo studio si è avvalso delle conoscenze già acquisite in merito al sottosuolo del centro storico di Napoli. L'interesse che giustifica la ricerca nasce dalla constatazione che il territorio napoletano è altamente suscettibile ai dissesti delle cavità (costituzione litologica del sottosuolo e presenza di vuoti realizzati per diversi scopi).

Le cavità hanno origini molto antiche. L'espansione della città ha richiesto l'utilizzo di ingenti quantità di materiale da costruzione (soprattutto tufi). La realizzazione di acquedotti sotterranei e di opere idrauliche per lo sfruttamento delle falde idriche o per il convogliamento delle acque reflue (fogne) hanno contribuito ad ulteriormente aggravare l'instabilità del territorio.

Quindi, per ridurre il rischio di crolli con conseguente apertura di voragini, occorre una corretta valutazione del rischio. Occorre inoltre, una conoscenza del sottosuolo sia in termini di presenza di cavità sia in termini di conoscenza dei terreni e di quanto al contorno può incidere sul manifestarsi di un dissesto.

Infine un aspetto importante è rappresentato anche dalla **necessità di divulgare le informazioni ad un pubblico di non specialisti**. Infatti, conoscere come si sono formate le cavità e come si deve e si può convivere con esse, è un modo per rivalutare un'eredità del passato spesso dimenticata.