

**STUDIO DELLA SUSCETTIBILITÀ AI FENOMENI DI SPROFONDAMENTO NEL TERRITORIO
URBANO DI ROMA. ELABORAZIONE DI CARTOGRAFIA TEMATICA.**

RISULTATI RAGGIUNTI

Gruppo di Lavoro ISPRA- CNR-IGAG

Stefania Nisio Coordinamento – ISPRA

Giancarlo Ciotoli – CNR-IGAG

Aldo Annunziatellis – ISPRA

Maria Grazie Finoia – ISPRA

Roberto Serafini - ISPRA

Francesco Stigliano – CNR-IGAG

Roma, Aprile 2018

Introduzione

Il territorio romano è tra le aree al mondo maggiormente interessate dai fenomeni di sprofondamento improvviso del terreno.

Le voragini (*sinkholes antropogenici*) che si aprono sulle strade urbane sono di natura antropogenica, dovute, per lo più, a crolli di cavità sotterranee realizzate dall'uomo o prodotte da fuoriuscite d'acqua da tubature idrauliche (Nisio 2010, 2011; Ciotoli *et al.* 2013, 2015).

Purtroppo, l'intricato sistema di gallerie sotterranee è conosciuto solamente in forma frammentaria e molte abitazioni civili sono state realizzate su tali vuoti, sconosciuti e non bonificati.

Il più importante censimento di *sinkholes antropogenici* a Roma è stato compiuto da ISPRA a partire dal 2008 (Nisio 2010, 2011 *cum biblio*; Ciotoli *et al.* 2013, 2015 b). Tale studio è ancora in corso e ha portato al censimento di più di 2700 eventi in sette anni.

Negli ultimi quindici anni si è assistito ad un aumento dei fenomeni: dal 2012 i sinkholes sono triplicati, con un numero di sprofondamenti che supera il centinaio di eventi l'anno (124 sinkholes nel 2012, 103 nel 2013, 90 nel 2014; 78 finora nel 2015). L'aumento della frequenza dei fenomeni ha portato alla necessità di fornire una cartografia tematica specifica per la valutazione della suscettibilità del territorio urbano di Roma, che fosse di supporto alle autorità locali per un più completa e consapevole gestione del territorio.

Le cavità sotterranee e gli sprofondamenti

Sono molti gli studi di tipo archeologico e geologico-geotecnico riguardanti le cavità sotterranee nel territorio di Roma. Manca, tuttavia, ad oggi, un database completo, che riporti l'effettiva estensione delle cavità, al fine di studiare la pericolosità del territorio.

Le cave nei terreni vulcanici sono le cavità maggiormente diffuse (Ciotoli *et al.* 2013, 2015 b); la coltivazione mineraria avveniva attraverso la realizzazione di gallerie che prevedeva un imbocco alla base del versante. L'utilizzo delle cave di tufo come aree di culto e cimiteriali è successivo e risale al I-III sec. d. C. Le 86 aree censite e adibite a catacombe ed ipogei privati rappresentano la seconda tipologia di cavità sotterranea per estensione. Le cave di conglomerati e sabbia infine, realizzate nella porzione sud-occidentale della città, hanno più scarsa estensione e non furono mai utilizzate come necropoli ma, successivamente, come depositi, fungaie, etc.

Al fine di migliorare e completare il censimento dei vuoti sotterranei l'ISPRA ha costituito un Gruppo di Lavoro (a cui partecipano vari enti, tra i quali: Roma Capitale, CNR, Protezione Civile Nazionale, Roma Metropolitane e Associazioni Speleologiche di Roma) che si sta occupando della raccolta dati.

Ai dati di tipo puntuale saranno presto affiancate le mappature delle cavità in forma areale. Sono molti a Roma i sinkholes antropogenici che hanno messo in luce la presenza di gallerie sotterranee di cui si era persa memoria. In questo lavoro è analizzata, sinteticamente, la presenza di tali fenomeni nell'area urbana di Roma che per comodità è stata suddivisa in quattro quadranti.

Nella zona settentrionale di Roma (I Quadrante, Municipi 13, 14 e parte del Municipio 15) le cavità sotterranee sono sporadiche e non presentano una grande estensione; si rinvengono soprattutto cunicoli idraulici (Ventriglia, 2002).

In questo quadrante, tuttavia, affiorano anche terreni clastici (Monte Vaticano), sottoposti, a volte, a coltivazione per estrazione di inerti (Via della Farnesina - Via Cassia). Il territorio presenta, morfologie collinari caratterizzate da scarpate e da discreta energia di rilievo che facilita il dilavamento degli strati superficiali e sciolti del terreno. Il 24 agosto del 1977 a Via della Balduina, tra Via Duccio Galimberti e Piazza della Balduina, si verificò un grande evento di sprofondamento con la formazione improvvisa di una voragine di circa 20 m di diametro e alcuni metri di profondità.

L'intera strada fu evacuata e tutto il quartiere rimase senza acqua e luce per alcuni giorni. Dopo quell'evento si sono verificati sulla stessa strada altri 11 eventi di sprofondamento, l'ultimo è stato registrato il 24 maggio 2014.

Il territorio del secondo quadrante (municipi parte dell'1, 2, 3, 4, e parte del 15) nasconde ancora necropoli e gallerie di coltivazione che formano un intricato reticolo, soprattutto presso la Via Salaria Stazione Termini-Via Nomentana. Il 4 settembre del 1964 una voragine, apertasi a Piazza Fiume, ha portato alla luce un vasto sistema di cunicoli sotterranei. Presso Via Po, il 12 settembre 2013, l'apertura di una voragine ha permesso di individuare due livelli sovrapposti di cunicoli di cui il più profondo posto a 12 m. L'area della stazione

Termini costituiva in passato un bacino di approvvigionamento del tufo; l'ultimo evento di sprofondamento è del 7 luglio 2014 presso Via Giolitti, che ha messo in evidenza ampi locali sotterranei di età romana. Il terzo quadrante è sicuramente quello maggiormente interessato da eventi di sinkholes e da presenza di cavità sotterranee (municipi parte dell'1, 5, 8, 7, 6). Nell'area dell'Appia Antica e della Caffarella le gallerie vennero utilizzate successivamente o realizzate sin da subito come catacombe. Ad agosto 2014, i sopralluoghi svolti nelle aree sotterranee, hanno portato alla conoscenza di un'ulteriore area di necropoli paleocristiana. L'ultimo sprofondamento nel quartiere Appio si è verificato il 22 Marzo 2018 – Circonvallazione Appia.



22 Marzo 2018 – Circonvallazione Appia

Nella zona Tuscolana - Via delle Cave - Quadraro le gallerie costituiscono un intricato reticolo di cui buona parte è sconosciuta (fig. 2). Presso il Quadraro, la via Columella è stata interessata in passato da molti sprofondamenti che hanno portato all'evacuazione di alcuni edifici già nel 1957, 1969, 1971; gli episodi più recenti si sono verificati nel 2005, 2010, 2014. Il settore Prenestino - Tiburtino sicuramente è stato il più sfruttato della città per le coltivazioni dei terreni piroclastici nel 1800, infatti gli "sforzellamenti" di cava sono ben visibili nelle cartografie del 1884 e 1907. I sistemi caveali, articolati su più livelli (Via Teano, Via Formia), sono stati in parte bonificati con la realizzazione della Metro C. Nel centro storico, poi, le cavità sotterranee si rinvennero, prevalentemente, presso il Celio e l'Aventino, dove i sistemi caveali hanno messo a rischio alcune abitazioni civili (fig. 3).

Nell'area di Monteverede – Gianicolense - Portuense (IV Quadrante, municipi 9,10, 11, 12) le coltivazioni interessavano un banco di tufo semi-litoide rossiccio (*lapis Ruber Auct.*). I luoghi di culto ipogeo erano molto estesi; oltre alle note catacombe di S. Pancrazio, di S. Ponziano ed alle catacombe ebraiche, la via Portuense nasconde ancora la necropoli più grande, quella di S. Felice, segnalata in vari testi storici ma non ancora rinvenuta. L'area ha mostrato nel tempo sempre una maggiore instabilità e negli ultimi anni sono aumentati gli eventi di sinkholes. L'ultimo sprofondamento si è verificato il 13 Marzo 2018 presso la Circonvallazione Gianicolense.

Nell'area a sud di Roma si è verificato uno sprofondamento presso Via Ambrosini angolo Via Accademia degli Agiati il 22 Novembre 2017.



13 Marzo 2018 Circonvallazione Gianicolense

Raccolta di dati ed elaborazione cartografica

Il modello concettuale per la definizione della carta di suscettibilità al verificarsi di uno sprofondamento è stato realizzato prendendo in considerazione:

1. le caratteristiche morfologicofisiografiche e geologiche del territorio;
2. gli aspetti antropici (presenza di cavità sotterranee e rete dei sottoservizi).

Una completa rappresentazione cartografica della pericolosità da *anthropogenic sinkholes* si può ottenere elaborando una mappa di suscettibilità in cui sono identificate le aree con caratteristiche tali da favorirne l'innescio del fenomeno.

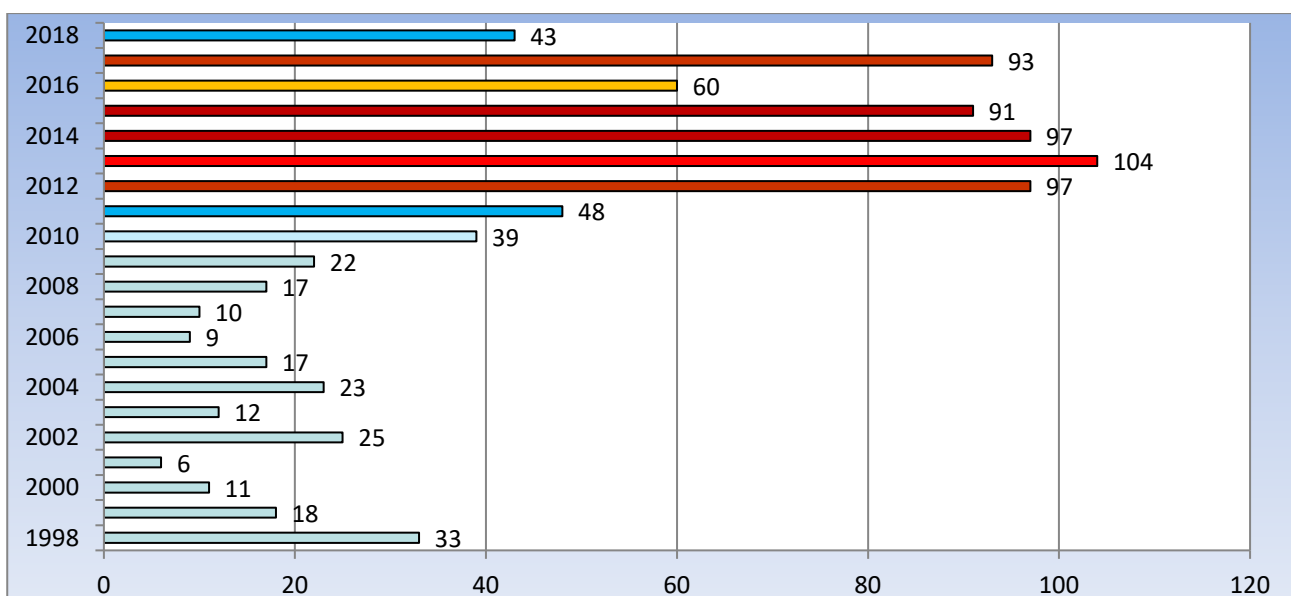
La prima fase prevede lo studio diretto della distribuzione degli eventi censiti mediante l'applicazione di alcune procedure e tecniche quantitative dell'analisi spaziale (Basso *et al.*, 2013, Ciotoli *et al.*, 2013, 2015 a, b; Meloni

et al., 2013). La seconda fase prevede l'utilizzo di metodi indiretti mediante analisi statistiche bivariate o multivariate che valutano l'importanza di alcune combinazioni "critiche". Sono state in seguito applicate tecniche di analisi spaziale 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. L'analisi di densità della distribuzione degli eventi costituisce una tecnica fondamentale e semplice per determinare l'area più incline alla presenza di sprofondamenti. Il geodatabase spaziale utilizzato comprende, oltre all'inventario degli sprofondamenti, le informazioni relative ad una serie di strati informativi che possono essere raggruppati in quattro categorie: fattori orografici, geologici, idrologici, antropici. Tutti gli strati informativi sono stati trasformati in un formato raster con una dimensione del pixel di 200x200 m e sono stati analizzati mediante software GIS (ESRI®ArcMap TM 10).

Fattori orografici. È stato utilizzato un modello digitale delle quote (DTM) con una risoluzione di 20 x 20 m per elaborare una mappa delle aree depresse ("sink") mediante il software ArchHydro.

Fattori geologici. È stata utilizzata la cartografia geologica di base distinta in unità morfo-litotecniche per ognuna delle quali è stata calcolata una frequenza percentuale di sprofondamenti. È stata, inoltre, considerata la carta dello spessore dei riporti, che ha fornito informazioni per gli sprofondamenti originati dall'azione dilavante dell'acqua (Ciotoli *et al.*, 2011; 2013).

Fattori idrologici. La carta delle isopieze è stata ricostruita a partire dal modello idrogeologico di Roma (ISPRA, 2008).

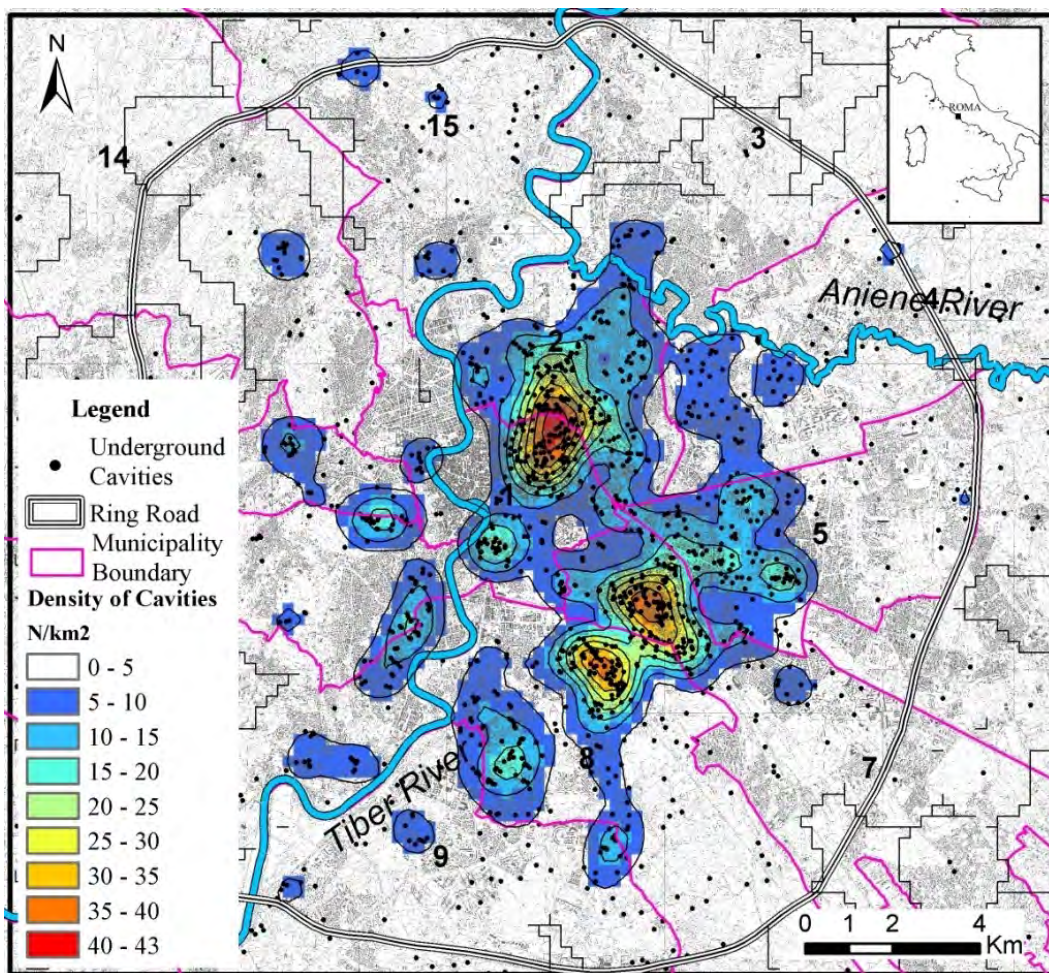


Distribuzione degli sprofondamenti a Roma sino al 2018

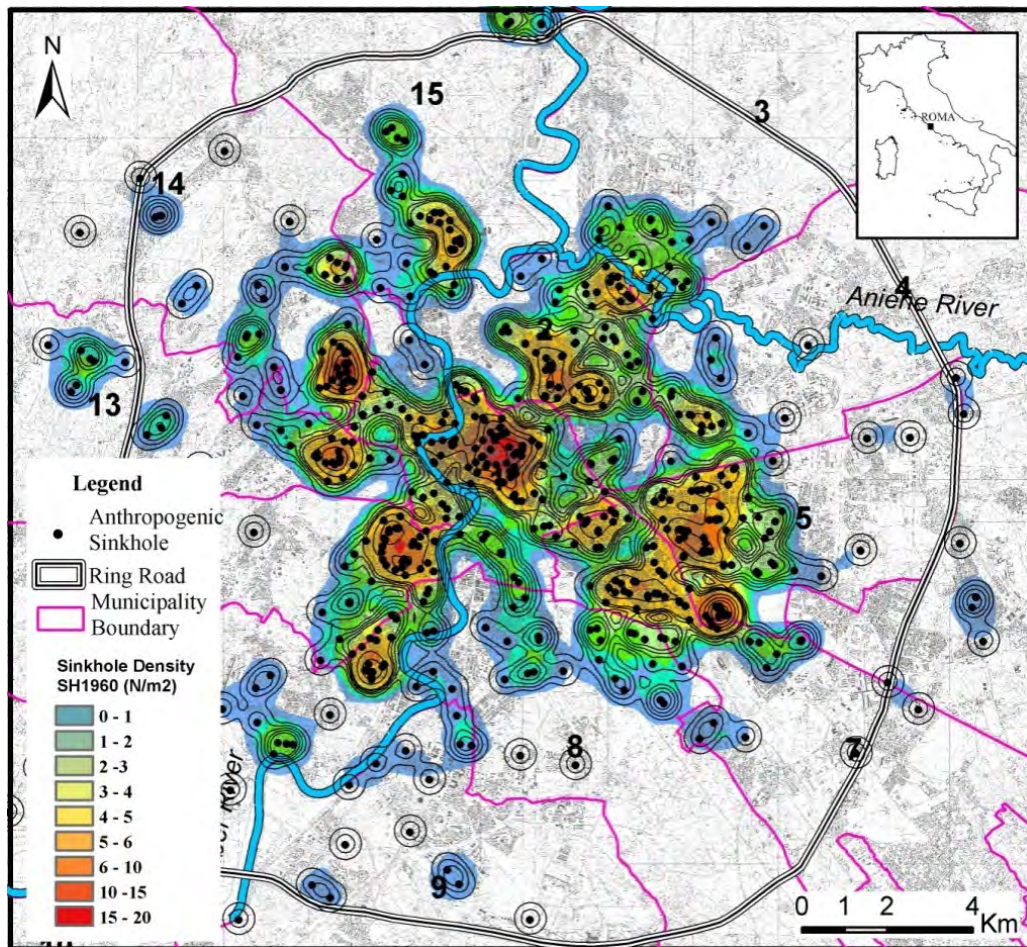
Dalla carta delle isopieze è stata derivata la carta della soggiacenza della falda superficiale per differenza con il raster del DTM.

Fattori antropici. Tra i fattori predisponenti sono stati considerati: l'ubicazione delle cavità ipogee, ubicazione degli imbocchi di cava e dei bunker sotterranei. Da questi dati è stata derivata la mappa di densità di cavità, dall'ubicazione della rete dei sottoservizi fognari (fornita da Roma Capitale) sono state prodotte la carta della densità della rete fognaria e la carta delle distanze degli sprofondamenti dal collettore fognario più vicino.

Nell'ambito della mappatura delle pericolosità ambientali costituisce un punto chiave la pesatura delle variabili in funzione della loro importanza nel fenomeno investigato, peso che generalmente viene assegnato in maniera soggettiva sulla base dell'esperienza dell'operatore. L'approccio statisticospaziale prevede l'applicazione della Regressione Geografica Pesata (Geographically Weighted Regression, GWR) mediante la quale è stata studiata l'interazione e la dipendenza tra i fattori che predispongono il fenomeno. Ciascuno strato informativo, dunque, rappresenta un fattore che condiziona la probabilità di verificarsi di uno sprofondamento, il cui peso è rappresentato dai coefficienti di una regressione multivariata risolta nello spazio.



Mappa di densità di cavità



Mappa di densità dei sinkhole

In questo caso specifico tutte le variabili indipendenti considerate (fattori predisponenti) sono state inserite nel foglio di input come variabili continue, mentre la variabile dipendente è stata considerata una variabile binaria (presenza/assenza sprofondamento).

L'analisi ha permesso di realizzare due carte di suscettibilità ai sinkholes sino al raccordo anulare. La prima è stata realizzata inserendo tutti gli eventi di sprofondamento compresi gli eventi storici, tratti dalla cartografia storica di fine '800 e di inizio secolo '900 (Ciotoli *et al.* 2015, b) e mostra un'area molto suscettibile ai sinkholes antropogenici tra il II e il III quadrante. In una seconda elaborazione, sono stati inseriti solo i dati dell'intervallo 1960 al 2013; in questo caso la suscettibilità aumenta nel I e nel IV quadrante e diminuisce contemporaneamente nel II quadrante (in particolare nel municipio 8) dove i fenomeni di sprofondamento risultano diminuiti in seguito alla bonifica del sottosuolo. Sono riportati sulla mappa di suscettibilità i sinkholes avvenuti nel 2014-2015.

Al fine di proporre un modello previsionale per l'individuazione di aree suscettibili ai sinkholes antropogenici si è tentato di confrontare la carta degli eventi di sprofondamento con la subsidenza dell'area romana. Sono stati

estrapolati i dati di abbassamento del suolo (InSAR) nel decennio 1992-2002.

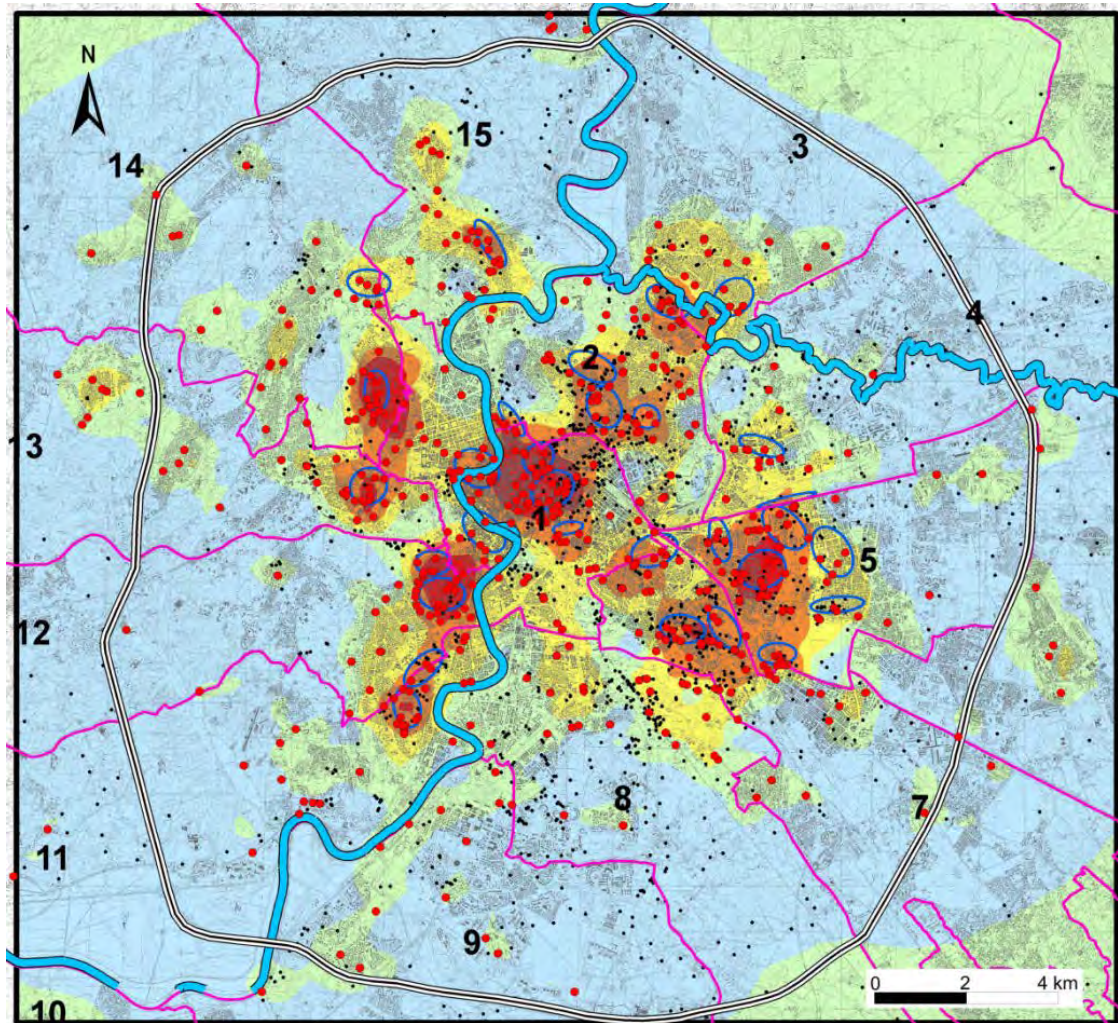
Essi mostrano molti punti in subsidenza con un maggiore infittimento nella fascia circostante il fiume Tevere, ovviamente dovuti al cedimento lento e graduale dei terreni alluvionali recenti.

Si è scelto, dunque, di operare su di un *layer* con esclusione della fascia del Tevere, e concentrando gli studi, sulla metà orientale di Roma dove gli eventi di sprofondamento sono più numerosi (quadrante III).

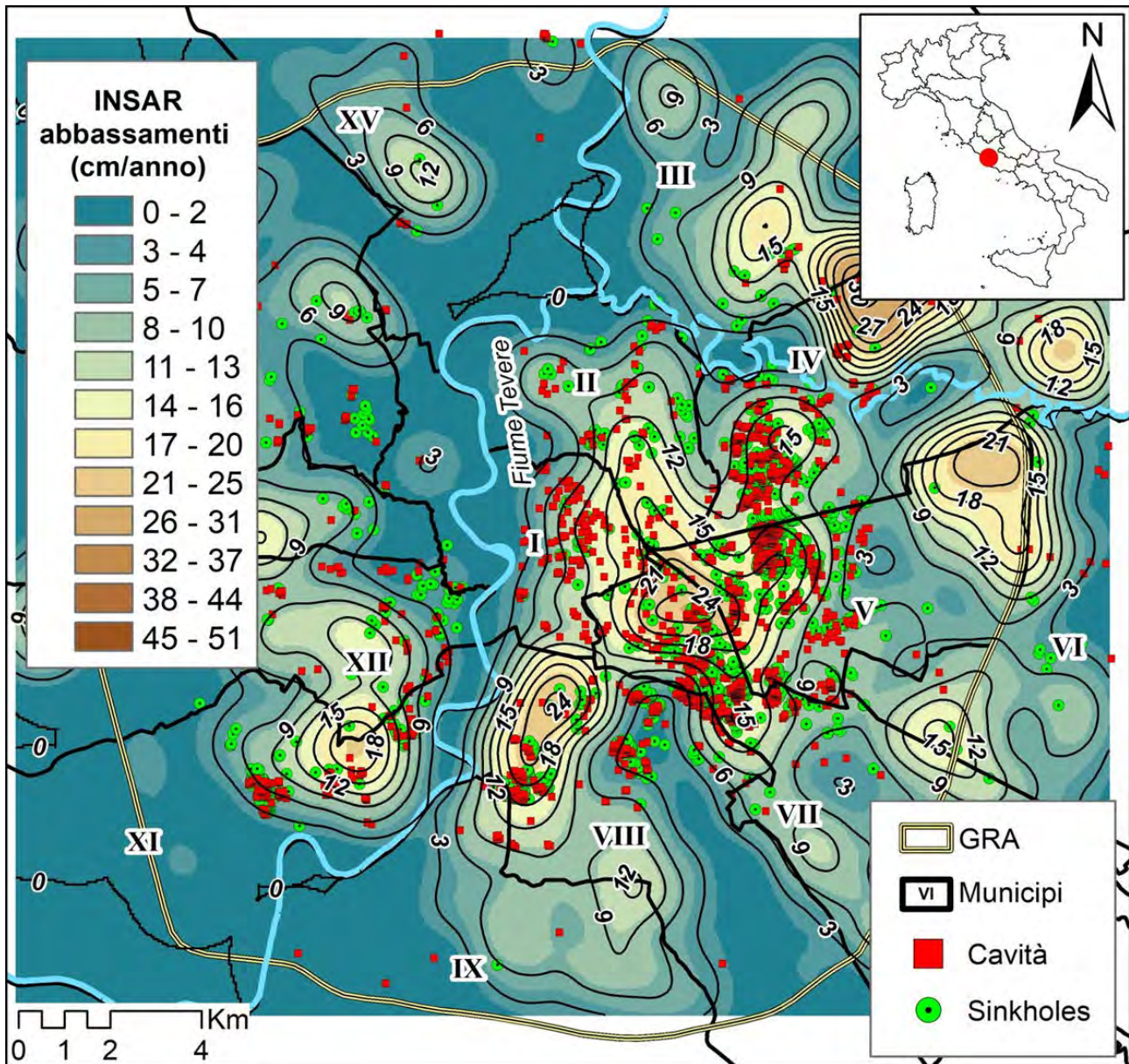
È stata realizzata, così, per il quadrante III, una prima mappa degli abbassamenti del suolo (relativa al decennio 1992-

2002), dividendo i valori di subsidenza registrata in quattro classi di velocità. Sulla mappa di abbassamento del suolo sono stati sovrapposti tutti i fenomeni di sinkholes censiti nello stesso intervallo temporale della subsidenza, cioè nell'intervallo 1992-2002. I risultati emersi sono interessanti: si individuano aree in

subsidenza corrispondenti a zone con diffuse cavità sotterranee e con sinkholes, risulta una stretta corrispondenza tra subsidenza registrata dall'InSAR e la data di formazione del sinkhole.



Mapa di scuscettibilità ai sinkhoes



Studi di abbassamento al suolo In Sar

Conclusioni

La città di Roma sorge sopra una complessa rete di cavità sotterranee, per gran parte ancora sconosciuta, prodotta dalle attività umane, a varie riprese, in più di duemila anni.

La presenza delle cavità sotterranee in particolari condizioni può provocare il crollo degli strati più superficiali del terreno con la formazione di voragini in superficie (*sinkhole antropogenici*).

Ulteriore concausa della formazione di tali *anthropogenic sinkholes* sono i guasti, le perdite e la disfunzione in genere della rete idraulica dei sottoservizi. Negli ultimi dieci anni si è assistito all'incremento della frequenza dei fenomeni, dovuto alla più fitta ed indiscriminata urbanizzazione del territorio nonché, probabilmente, alla variazione del regime pluviometrico che ha visto negli ultimi anni il susseguirsi di eventi piovosi molto intensi. I numerosi dati raccolti (cavità riscontrate in sondaggio, antichi imbocchi di cava, bunker, catacombe, ipogei privati) hanno consentito di realizzare una serie di mappe. La mappa di densità delle cavità, aggiornata al 2014, ha messo in evidenza che più di 20 km² di territorio romano sono interessati da cavità sotterranee.

Il censimento dei sinkholes (più di 2700) ha permesso di realizzare una mappa di densità di sinkhole da cui si evince che buona parte del territorio romano (più di 30 km²) è stata interessata da eventi di sprofondamento in più di 100 anni di sfruttamento del terreno urbano. In questo scenario il concetto di rischio è stato

sostituito con la suscettibilità, definita come la probabilità che un evento di sprofondamento antropogenico si verifichi in un determinato spazio, in un periodo di tempo infinito. La sovrapposizione tra i vari strati informativi e il confronto con i dati geologico-geomorfologici e antropici hanno permesso di realizzare una carta di suscettibilità ai sinkholes, aggiornata al 2015, in cui vengono rappresentate differenti classi di propensione al dissesto.

I municipi maggiormente interessati dai fenomeni sono quelli del settore orientale della città, dove affiorano i depositi vulcanici, sottoposti in passato ad una massiccia estrazione mineraria (soprattutto il III quadrante e l'area al limite tra il II e il III quadrante).

Le aree a più alta suscettibilità del territorio urbano (probabilità di accadimento pari al 95%) sono 6.76 km²; le aree con probabilità di evento pari al 90% hanno estensione di 33.18 km². All'interno del Raccordo Anulare (estensione totale pari a 350 km²) su circa 40 km² di territorio urbano (circa 11%) esiste una probabilità molto alta di innesco di un evento di sinkholes.

Di seguito sono stati confrontati gli eventi di sinkholes i con i dati dell'abbassamento al suolo (InSAR anni 1992-2000), con l'esclusione della fascia del Tevere. I risultati sinora emersi sono interessanti: escludendo le aree in cui la subsidenza può essere compatibile con altre problematiche (terreni alluvionali e costipabili, riporti antropici etc.), vi è una buona corrispondenza tra le aree in lenta subsidenza e gli eventi di sinkholes registrati.

Bibliografia

- Basso N., Ciotoli G., Finoia M. G., Guarino P. M., Miraglino P., Nisio S. (2013) - *Gli sprofondamenti nella città di Napoli*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 73-104.
- Ciotoli G., Corazza A., Finoia M.G., Nisio S. Succhiarelli C. (2013) – *Gli sprofondamenti antropogenici nell'aria urbana di Roma*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 143-182.
- Ciotoli G., Finoia m.G., Liperi L., Meloni F., Nisio S., Tonelli V., Zizzari P. (2015 a) - *Sinkhole susceptibility map of the Lazio Region, central Italy*. Journal of Maps 1/2015
- Ciotoli G., Nisio S., Serafini R. (2015 b) – *Analisi della suscettibilità ai sinkholes antropogenici nel centro urbano di Roma*. Mem. Descr. Della Carta Geol. d'It. Vol.98.
- Ciotoli G., Stigliano F., Marconi F., Moscatelli M., Mancini M., Cavinato G.P. (2011) - *Mapping the Anthropic Backfill of the Historical Center of Rome (Italy) by Using Intrinsic Random Functions of Order k (IRF-k)*, Computational Science and Its Applications ICCSA 2011, International Conference Santander, Spain, June 20- 23, 2011 Proceedings, Part I, Beniamino Murgante, Osvaldo Gervasi, Andrés Iglesias, David Taniar Bernady O. Apduhan (Eds.), © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011, DOI 10.1007/978-3- 642-21928-3.
- Meloni F., Nisio S., Liperi L., Tonelli V., Zizzari P., Ciotoli G. (2013) -*Carta dei sinkholes della Regione Lazio*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93.
- Nisio S. (2010) - *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani*. Atti 2° Workshop internazionale: I sinkholes. Gli sprofondamenti catastrofici nell'ambiente naturale ed in quello antropizzato. Roma 3-4 dicembre 2009. ISPRA, 845-864.
- Nisio S. (2011) - *Fenomeni di sprofondamento in alcuni centri urbani*. VII Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano, ISPRA.
- Ventriglia U. (1971) - *La geologia della città di Roma*. Bardi Ed.
- Ventriglia U. (2002) – *Geologia del territorio del Comune di Roma*. Editore Cerbone, Napoli.