

Progetto Suscettibilità di Roma ai sinkholes antropogenici



A Cura di
Nisio S., Ciotoli G.
& Annunziatellis A., Di Salvo C., Finoia M.G., Moretti P.,
Gaudiosi I., Pennica F., Stigliano F.

Progetto
Suscettibilità di Roma ai sinkholes antropogenici

ISPRA- CNR IGAG

Relazione tecnica 2022

A Cura di

Nisio S., Ciotoli G.

& Annunziatellis A., Di Salvo C., Finoia M.G., Moretti P., Gaudiosi I., Pennica F., Stigliano F.

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, 2015a, b, 2018).

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, *cum biblio*; Ciotoli *et al.* 2013, 2015 b). Tale studio è ancora in corso e ha portato al censimento di più di 4000 eventi in quattordici anni. Gli studi riguardanti l'individuazione di *sinkholes* prone areas all'interno dei vari municipi, in particolare, sono stati svolti da ISPRA in collaborazione con il CNR-IGAG.

Negli ultimi quarant'anni si è assistito ad un aumento dei fenomeni: dal 2012 i *sinkholes* sono triplicati, con un numero di sprofondamenti che supera a volte il centinaio di eventi l'anno (124 *sinkholes* nel 2012, 103 nel 2013, 90 nel 2014; 91 nel 2015, 122 nel 2019); il picco massimo è stato raggiunto nel 2018 con 175 *sinkholes* formati entro il raccordo anulare.

L'aumento così sconcertante 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.

Una prima cartografia è stata realizzata nel 2015 a cui è seguito uno studio nel 2018 compiuto da un apposito Gruppo di Lavoro (GdL) ISPRA-CNR-IGAG.

Tra il 2021/2022 il GdL ISPRA ha eseguito un aggiornamento dei dati e un ulteriore studio del territorio romano di cui si espongono i risultati.

Le cavità sotterranee e gli sprofondamenti

Sono molti gli studi di tipo archeologico e geologico-geotecnico riguardanti le cavità sotterranee nel territorio di Roma.

Nel 2017 ISPRA ha pubblicato il primo studio con la effettiva mappatura delle cavità sotterranee (Nisio, 2017; Bisconti *et al.* 2017) le aree cartografate rappresentano purtroppo solamente una parte dell'effettiva realtà sotterranea. A partire dal 2018 ISPRA ha proceduto ad un aggiornamento della carta delle cavità sotterranee e ad uno studio più dettagliato della suscettibilità del territorio.

E' al momento in corso di realizzazione un database completo, che riporta l'effettiva estensione delle cavità, al fine di studiare la pericolosità del territorio.

Gli ambienti ipogei al di sotto del territorio romano sono di differente tipologia: Cave, condotti idraulici, cimiteri, luoghi di culto, cisterne etc.

Le cave realizzate nei terreni vulcanici sono le cavità maggiormente diffuse (Ciotoli *et al.* 2013, 2015 b, Bisconti *et al.* 2017, Nisio *et al.* 2017); 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 solo 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.

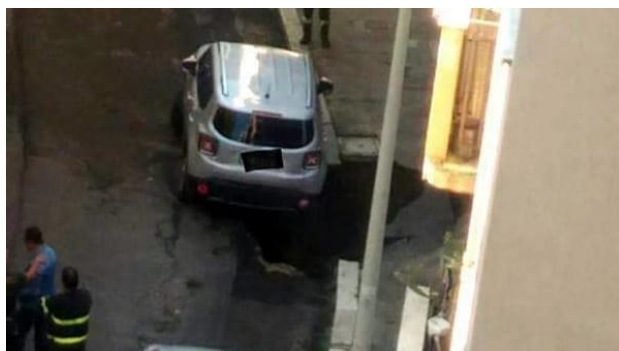
Al primo censimento degli ambienti ipogei di Roma nel 2015 l'ISPRA ha coinvolto vari enti, tra i quali: Roma Capitale, CNR, Protezione Civile Nazionale, Roma Metropolitane e Associazioni Speleologiche di Roma. Il lavoro svolto necessita di un aggiornamento al fine di realizzare una mappa più completa delle cavità in forma areale.

La presenza di tali reti di gallerie ipogee determina è la causa principale del formarsi di *sinkholes* antropogenici e questi ultimi mettono continuamente in luce nuovi ambienti ipogei di cui si era persa memoria.

Osservazioni nei quattro quadranti

Al fine di analizzare il territorio Roma è stata suddivisa in quattro quadranti.

Nella zona settentrionale di Roma, quadrante **NO** (o **I Quadrante**, Municipi 13, 14 e parte del Municipio 15) le cavità sotterranee sono sporadiche e non presentano una grande estensione; si rinvencono soprattutto cunicoli idraulici (Ventriglia, 2002). In questo quadrante, tuttavia, affiorano oltre ai terreni piroclastici 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 grande sinkhole è stato registrato nel 2019.



Da sinistra: Voragine via Pereira 31 ott 2019; Voragine in Via Cesio Basso 9 ott 2018

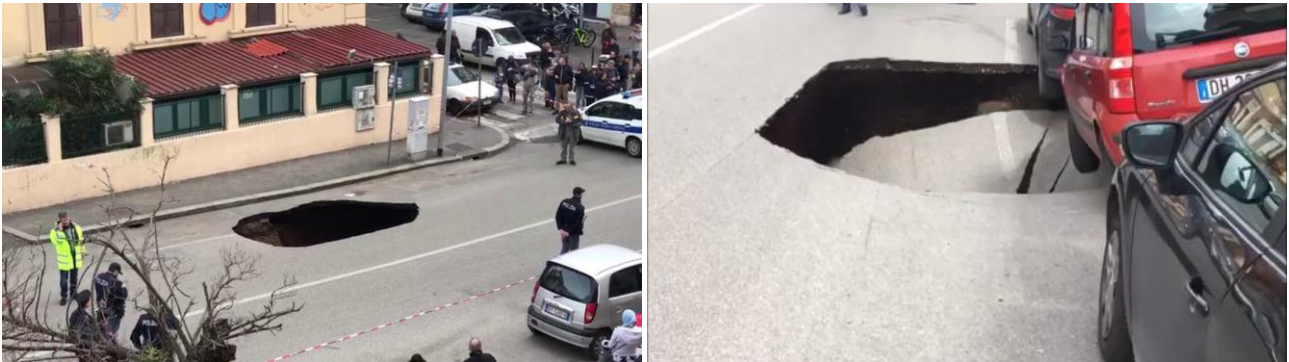
Il territorio del **secondo quadrante NE** (municipi parte dell'1, 2, 3, 4, e parte del 15) nasconde ancora necropoli e gallerie di coltivazione che formano un intricato reticolo, soprattutto presso la Via Salaria Stazione Termini- Via Nomentana. Il 4 settembre del 1964 una voragine, apertasi a Piazza 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.



Da sinistra: Voragine in via Filippo Antonio Gualtiero, in zona Nuovo Salario 24 ago 2021; Voragine in Via Monte Cervialto 16 giu 2021; Voragine Largo Somalia 5 dic 2021.

Il terzo quadrante SE 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. Nella zona Tuscolana - Via delle Cave - Quadraro le gallerie costituiscono un intricato reticolo di cui buona parte è sconosciuta. 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 "sforamenti" di cava sono

ben visibili nelle cartografie del 1888 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 rinvengono, prevalentemente, presso il Celio e l'Aventino, dove i sistemi caveali hanno messo a rischio alcune abitazioni civili (fig. 3).



Voragine 22 mar 2018 Circonvallazione Appia

Nel Quadrante SO (IV Quadrante, municipi 9,10, 11, 12), in particolare nell'area di Monteverede – Gianicolense - Portuense 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.



Da sinistra: Voragine Viale dei colli Portuensi 15 apr 2021; Viale dei Colli Portuensi 9 apr 2022

Censimento e distribuzione dei sinkholes nel tempo

I sinkholes censiti da ISPRA provengono da varie fonti. Per quanto riguarda i fenomeni più antichi questi sono stati raccolti attraverso osservazioni svolte su cartografia storica (IGN 1988, CTR in scala 1:5000, 1907).

Ulteriori studi sono stati compiuti sulle foto aeree dei voli svolti negli anni 1930-1960.

La raccolta presso le emeroteche e le cronache storiche ha riguardato un intervallo di tempo che va dal 1876 al 1954. In tale intervallo è presente un ampio periodo di tempo a cavallo dei due conflitti mondiali in cui non vi sono dati.

La gran parte dei fenomeni censiti, provengono dalle cronache recenti e dalle segnalazioni di Enti, professionisti e cittadini.

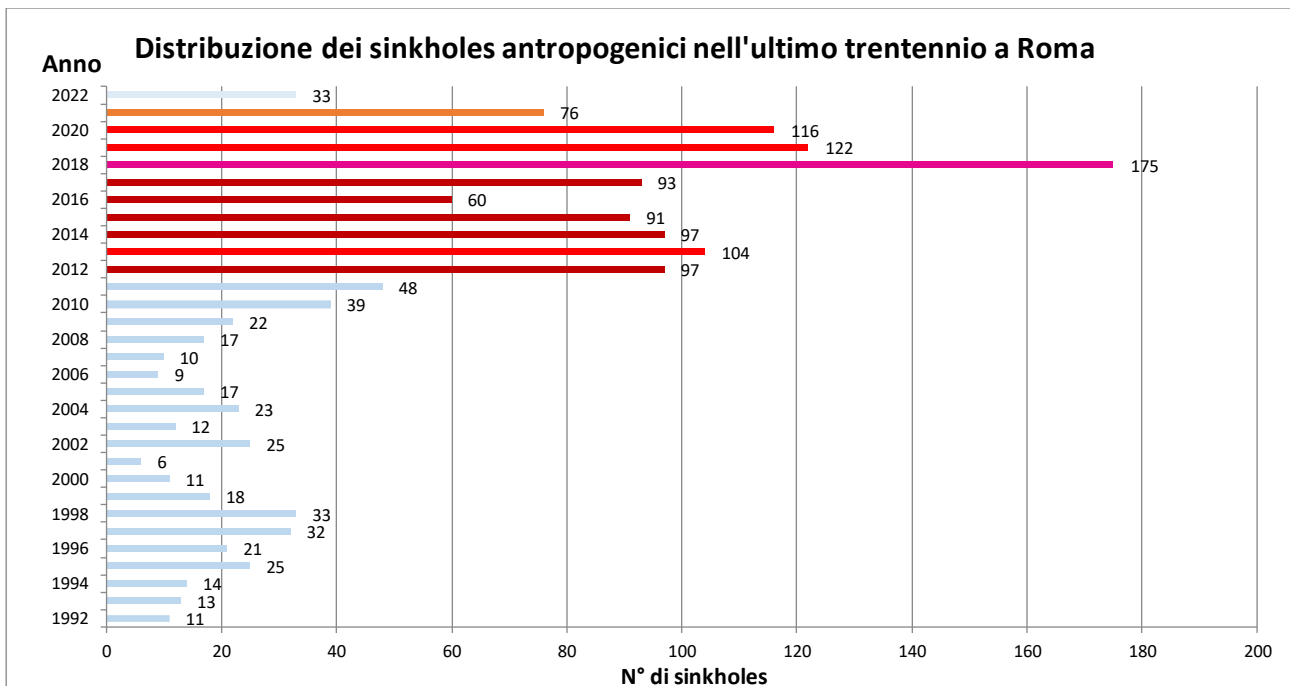
Per quanto riguarda l'attendibilità e la completezza dei dati bisogna tener presente che in epoca recente è aumentata l'informazione grazie alla diffusione di quotidiani on line rispetto al passato e che il censimento di ISPRA non è certamente completo. Tuttavia i dati degli ultimi anni attestano un aumento dei casi anche in corrispondenza alle stagioni piovose e agli eventi estremi.

Fonte	N° sinkhole
Emeroteche 1876 -1906	8
Cartografia storica IGM 1888	463
Cartografia storica CTR 1907	1376
Emeroteche 1910 -1944	21
Foto aeree 1930-1944	172
Emeroteche 1948- 1954	6
Foto aeree 1945-1960	387
Cronache storiche – Emeroteche 1949-1986	190
Cronache Online 1986 -2022 - Segnalazioni di Enti e di cittadini	1492
Letteratura (Prog. AVI- Prot, Civile)	64
Totale	4179

Tab. 1 Fonti per il censimento dei sinkholes.

L'analisi della distribuzione delle voragini nel tempo mostra che a partire dal 2012 si osserva un incremento dei casi per arrivare ad una media di circa 100 sinkholes l'anno.

L'anno con più fenomeni è stato il 2018 (con 175 voragini), in cui si è osservato anche un incremento delle piogge e un clima più rigido con la comparsa della neve. La tendenza verso il 2022 (anno di siccità) è stata quella di una diminuzione dei casi (33 nel 2022 fino al 31 agosto) in relazione anche a una primavera molto asciutta. L'analisi del 2022 dovrà essere effettuata a dicembre i casi potrebbero aumentare con l'arrivo dell'autunno e delle piogge.



Distribuzione dei sinkholes negli anni. Dati sino al 31.08.2022.

Nel 2003 i fenomeni diventano una volta e mezza ma dal 2012 i casi si triplicano per arrivare ad una media di 97 voragini l'anno.

Decennio	n° sinkhole	Media sinkhole per anno
Decennio 1973-1982	57	6
Decennio 1983-1992	111	11
Decennio 1993-2002	195	19
Decennio 2003-2012	293	29
Decennio 2013-2022*	968	97

Tab. 2 - Distribuzione di sinkhole per decennio. (* I dati per l'anno 2022 non sono completi sono stati registrati sino all'agosto 2022).

Le Cavità sotterranee si concentrano maggiormente nei quadranti SE e NE, come si evince dalla mappa di densità di cavità. I sinkholes sono maggiormente diffusi e si sviluppano anche nei quartieri del primo quadrante.

Elaborazione della mappa di suscettibilità ai sinkhole antropogenici

La formazione di un sinkhole, sia di origine naturale sia antropogenica, costituisce un fenomeno (alla stregua di un terremoto) per cui non è quasi mai possibile effettuare valutazioni probabilistiche sul verificarsi dell'evento in un certo orizzonte temporale, e quindi attualmente non è possibile quantificare il rischio associato a tale fenomeno soprattutto nelle aree urbane dove il rischio è maggiore data la grande presenza di infrastrutture.

Per ovviare a questa difficoltà, il concetto di "rischio" è stato sostituito con quelli più generici di pericolo e/o suscettibilità, dove viene eliminato il termine probabilistico legato al tempo, e il "rischio" è indicato in termini esclusivamente spaziali, cioè che *"un sinkhole possa verificarsi in una certa area in un intervallo di tempo infinito e che una certa area ha caratteristiche che favoriscono il processo di sinkhole"*. La suscettibilità definisce, quindi, la propensione di un territorio a generare sinkhole in relazione alla presenza di fattori predisponenti (variabili fisiche, antropiche e/o geoambientali) la cui distribuzione spaziale governa il potenziale verificarsi del fenomeno.

Nelle aree urbanizzate il fattore predisponente più importante è generalmente costituito dalla presenza di cavità sotterranee preesistenti (catacombe, ipogei, cave, ecc.) la cui instabilità e cedimento della volta può propagarsi fino alla superficie generando crolli improvvisi. Un altro fattore importante è connesso con i processi erosivi nel sottosuolo per exfiltrazioni e/o infiltrazioni causate dal dissesto del sistema di smaltimento fognario o della rete sotterranea di approvvigionamento idrico che con l'estendersi dell'erosione e il progressivo ampliamento di cavità sotterranee può progredire esternamente in modo improvviso con l'apertura di voragini sul piano stradale. In questo ultimo caso, il verificarsi di eventi meteorici estremi (intensi e/o prolungati) può costituire un fattore di innesco molto importante soprattutto per quello che concerne le zone urbane a rischio di allagamento (Di Salvo et al., 2018).

Una rappresentazione cartografica della pericolosità da sinkhole antropogenici si può ottenere elaborando una mappa di suscettibilità in cui sono identificate le aree con caratteristiche tali da favorire l'innesco del fenomeno. Uno degli obiettivi di questo progetto riguarda nello specifico la costruzione di un modello spaziale, applicabile in altre aree simili, mediante il quale individuare i fattori principali che predispongono l'innesco di tale fenomeno e e costruire una mappa delle aree a maggiore suscettibilità.

Metodologia

Analisi Geospaziale - La prima fase prevede la costruzione di un modello concettuale in cui vengono individuati alcuni potenziali fattori predisponenti il fenomeno dei sinkhole antropogenici in area urbana. Tutti i fattori selezionati (variabili indipendenti), insieme con il database dei sinkhole (variabile risposta), sono inseriti in un geodatabase, gestito in ambiente GIS, in formato shapefile (elementi a geometria puntuale, lineare e poligonale) e/o in formato raster (grid). Tutti i layer in formato grid (originari e/o prodotti) sono stati costruiti alla risoluzione di 10 x 10 m.

La seconda fase consiste nell'analisi della distribuzione spaziale degli elementi a geometria puntuale, lineare e poligonale che costituiscono gli strati informativi considerati. L'analisi è stata effettuata mediante l'applicazione di alcune procedure e tecniche quantitative dell'analisi geospaziale, normalmente

implementate nei sistemi geografici informativi, rivolte all'analisi del pattern di distribuzione, del vicinaggio e della densità. L'analisi del pattern spaziale è effettuata mediante il tool di ArcGIS "Average Nearest Neighbour (ANN)" index. Esso fornisce indicazioni sul tipo di distribuzione (casuale, dispersa e cluster) degli elementi che costituiscono lo strato informativo e sulla distanza media osservata e attesa per una data distribuzione. L'indice di vicinaggio misura la distanza tra ogni evento e il suo più vicino e ne fa la media; se il rapporto tra la distanza osservata e la distanza attesa è inferiore a 1 (media per un'ipotetica distribuzione casuale), la distribuzione degli eventi è raggruppata ("cluster"), se è maggiore di 1 la distribuzione degli eventi è dispersa. In genere le attività antropiche non producono pattern di tipo casuale, ad esempio una distribuzione cluster mette in evidenza zone in cui gli elementi sono più vicini fra loro e quindi dove il fenomeno geografico analizzato è maggiormente presente.

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. L'analisi di prossimità, effettuata mediante il tool "Near", calcola la distanza tra gli elementi di input (ad es., sinkhole) e l'elemento più vicino in un altro livello informativo (ad es., cavità sotterranee); tale informazione è importante per valutare in via preliminare l'esistenza di una relazione spaziale fra due fenomeni geografici.

L'analisi di densità della distribuzione degli eventi costituisce una tecnica fondamentale e semplice per determinare l'area più incline alla presenza di un determinato fenomeno geografico. L'ipotesi su cui si fonda il modello di densità è rappresentata dal fatto che le zone caratterizzate da una maggiore presenza di eventi costituiscono delle aree in cui è più probabile che se ne verifichino altri (Brzezinski, 2004). L'analisi della densità è stata effettuata mediante l'applicazione della "Kernel Density Estimation" (KDE) (Silverman, 1986). La KDE restituisce una mappa di densità che rappresenta il numero di elementi per unità di area a partire dalla distanza di vicinaggio attorno a tali elementi. La distanza di vicinaggio è individuata dalla distanza media osservata con il NNI. L'analisi di densità può essere calcolata sia per gli elementi puntuali sia per quelli lineari. Le mappe di densità forniscono una zonazione preliminare del territorio, una mappa di densità dei sinkhole costituisce un primo elemento di valutazione della suscettibilità di un'area a questo fenomeno.

Random Forest Regression - L'analisi di suscettibilità è stata effettuata mediante la Random Forest Regression (RFR). La Random Forest (RF) è una metodologia versatile di machine learning sviluppata da Leo Breiman capace di affrontare sia compiti di classificazione che di regressione (Breiman, 2001). La RF consente anche l'applicazione di metodi per la riduzione della dimensione del dataset, per la gestione dati mancanti, degli outliers ed altre fasi essenziali di esplorazione dei dati.

Le unità di apprendimento di base nella RF sono alberi di classificazione o regressione che suddividono i dati in sottoinsiemi più piccoli, e statisticamente più omogenei, trovando predittori e valori con cui dividere i sottoinsiemi al fine di minimizzare la somma degli errori quadratici. I singoli alberi caratterizzati da una bassa distorsione e un'elevata varianza e si adattano bene ai dati di training, ma sono sensibili a piccoli cambiamenti (overfitting). Pertanto, in una RFR si tende a far creare un gran numero di alberi di regressione ($N > 500$) utilizzando una procedura di sotto campionamento (bootstrap) dei dati originali al fine di ridurre la correlazione tra i singoli alberi. La non correlazione degli alberi è ulteriormente aumentata inserendo più casualità nel processo di crescita degli alberi mediante la valutazione di un solo sottoinsieme selezionato casualmente tra i predittori disponibili ad ogni divisione. La RF è protetta dall'overfitting, nel senso che la sua accuratezza predittiva non è influenzata negativamente dall'aumento del numero di alberi (Kuhn e Johnson, 2013). In questo studio è stato utilizzato il tool "Forest-based Classification and Regression" implementato nello Spatial Statistics Tool di ArcGIS Pro 3.0.1 (Copyright ©2022 Esri Inc.).

Acquisizione dati e Fattori predisponenti

L'identificazione e la costruzione di un database geospaziale di fattori predisponenti il fenomeno dei sinkhole giocano un ruolo cruciale nella modellazione della suscettibilità. Tuttavia, non ci sono regole universalmente accettate per definire quale possa essere l'insieme più efficace dei fattori che condizionano il fenomeno sinkhole. Questi ultimi possono essere differenti a seconda delle caratteristiche geologiche, litologiche, idrogeologiche e antropiche dell'area di studio. La mappa di suscettibilità al fenomeno sinkhole per l'area vasta è stata costruita analizzando le relazioni spaziali esistenti tra la localizzazione delle voragini e una serie di potenziali fattori predisponenti. In particolare sono state prodotte mappe tematiche di 11 fattori

predisponenti suddivisi in 3 categorie: (1) fattori antropogenici, (2) fattori idrogeologici/idrologici; (3) fattori geologici e geomorfologici.

Fattori antropogenici

Cavità sotterranee. Le tipologie di cavità che sono state rinvenute nel territorio investigato possono essere classificate in: cave per materiali da costruzione, catacombe, ipogei singoli, cunicoli, bunker, cavità in sondaggio (Nisio et al., 2017; Nisio et al., 2021). Nell'ambito del sistema informativo territoriale MOSCAS, le cavità sono state rappresentate in strati informativi a geometria puntuale, caso in cui non si conosce l'involuppo sotterraneo della cavità, e poligonale, caso in cui la possibilità di effettuare sopralluoghi da parte delle associazioni speleologiche ha permesso la ricostruzione della geometria in sotterraneo della cavità. Nell'ambito del modello di suscettibilità, gli strati informativi delle cavità sotterranee sono stati inseriti in forma di mappa di densità per le cavità a geometria puntuale e come distanza dalla cavità più vicina per le cavità poligonali.

Caditoie. La localizzazione delle caditoie (fornita da Roma Capitale) per la raccolta delle acque reflue è stata utilizzata come variabile potenzialmente legata alla presenza di zone suscettibili di allagamento in caso di eventi piovosi estremi o di lunga durata.

Collettori. L'ubicazione della rete dei sottoservizi fognari (rete dei collettori, fornita da Roma Capitale) è stata inclusa nel modello come ulteriore causa della formazione di sinkhole dovuta a processi erosivi di esfiltrazioni e infiltrazioni idriche per guasti, perdite e disfunzione della rete idraulica, oppure in occasione di eventi piovosi estremi, che possono causare fenomeni di subsidenza in superficie fino alla formazione di voragini. Nell'ambito del modello di suscettibilità è stata considerata la distanza tra i sinkhole e il collettore più vicino; ai collettori è stato applicato una zona di rispetto di 20 m.

Piezometria. In area urbana, le acque sotterranee possono condizionare e predisporre il territorio alla formazione di sinkhole nei seguenti casi: i) l'oscillazione stagionale del livello di falda (in genere abbassamento) può causare una perdita di supporto per il materiale fine negli spazi rocciosi fino a dare origine a fenomeni di collasso in superficie, ii) la modifica del gradiente del livello di falda (dovuta alla rimozione o all'introduzione di acqua nel sistema idrogeologico) può causare un rapido dilavamento del materiale sciolto causando il collasso della superficie. I dati piezometrici riferibili alla profondità della falda superficiale in metri sul livello del mare sono stati ottenuti dalla Mappa Idrogeologica della Città di Roma (La Vigna et al., 2016). La mappa è stata ricostruita utilizzando il Kriging Ordinario (OK) a partire dagli shapefile delle isolinee e dei punti quotati in corrispondenza di pozzi e/o piezometri.

Allagamenti. Nel corso degli ultimi 15 anni, è stato osservato un incremento di eventi piovosi di breve durata ma di forte intensità (> 40 mm/ora). L'elevata suscettibilità del territorio urbano di Roma agli allagamenti per forti eventi pluviometrici è dovuta principalmente al malfunzionamento, sottodimensionamento o addirittura all'assenza della rete fognaria (soprattutto nei quartieri più periferici). La rete di drenaggio naturale, spesso obliterata, è in molte zone sostituita dalla rete fognaria, spesso insufficiente a sostenere il volume d'acqua nel caso di eventi piovosi di estrema intensità. Chiaramente il ristagno in superficie dell'acqua non smaltita costituisce un fattore che può incrementare l'infiltrazione dell'acqua nel sottosuolo portando alle stesse conseguenze descritte per le caditoie e i collettori della rete fognaria. Il database delle zone allagate nel periodo 2001-2014 fa riferimento al lavoro di Di Salvo et al. (2018). In questo periodo si sono verificati 26 eventi piovosi estremi che hanno messo in evidenza nell'area vasta MOSCAS 58 zone allagabili a geometria poligonale e 92 a geometria puntuale.

Fattori geologici e geomorfologici.

Litologia. La litologia è un fattore predisponente intrinseco nel territorio urbano di Roma. La litologia è strettamente legata alla presenza di cavità sotterranee (catacombe, cave, cunicoli, ecc.) che in genere interessano i depositi piroclastici pozzolanacei e tufacei di età pleistocenica del Distretto Vulcanico dei Colli Albani e, subordinatamente (in destra idrografica del Tevere), le vulcaniti del Distretto Vulcanico dei Monti Sabatini e le formazioni sedimentarie pleistoceniche (sabbie e ghiaie dell'Unità di Ponte Galeria e di Santa

Cecilia) (Ventriglia & Sciotti, 1970; Crescenzi et al., 1995; Ventriglia, 2002). Le varie litologie della Carta delle Unità Litotecniche derivata dal foglio CARG “Roma” (scala 1:50000) sono state raggruppate in 5 classi a cui è stato assegnato un punteggio da 1 a 5 sulla base delle litologie cavabili e del numero di cavità presenti in una certa litologia.

Spessore dei riporti. La storia millenaria dell’attività umana nel territorio di Roma ha fortemente rielaborato la topografia andando a colmare e/o obliterare le valli fluviali, modificandone spesso il drenaggio originario, modificare le pendenze dei versanti collinari, costruire strade, estrarre materiale dal sottosuolo, ecc. Tutte queste attività hanno inevitabilmente creato un tipo di deposito antropico definito come “riporto”. I riporti costituiscono un vero e proprio “corpo geologico” in quanto si presentano costantemente sovrapposti al suolo naturale. Per le sue caratteristiche intrinseche, il riporto è costituito da materiale molto eterogeneo con scarse caratteristiche meccaniche e pertanto si può considerare uno dei fattori geologici che condizionano il verificarsi di fenomeni di sprofondamento. In particolare, lo spessore del riporto può fornire importanti informazioni soprattutto nel caso di sprofondamenti (tipo “scavernamenti”) originati dall’azione dilavante ad opera della circolazione dei fluidi nel sottosuolo (Ciotoli et al., 2015). La mappa dello spessore dei riporti è stata ottenuta dalla rielaborazione dei dati riportati in Ciotoli et al. (2015) con i quali è stato prodotto un raster con risoluzione 50 x 50m. Nell’area di studio lo spessore dei riporti varia tra 0.5 e 8.5m (Fig. 3.6.34 a, mappa dello spessore dei riporti).

Depressioni morfologiche. La presenza di depressioni morfologiche costituisce un fattore predisponente la formazione di sinkhole sia perché può indicare lo stato iniziale di formazione di una voragine nel sottosuolo sia perché può costituire una zona di accumulo di acque superficiali (area allagabile). Le depressioni morfologiche sono state ottenute dal lavoro di Di Salvo et al. (2018). Nell’area MOSCAS sono state individuate circa 1700 depressioni morfologiche con area variabile da 4 a 350000 m². Nell’ambito del modello di suscettibilità è stata considerata la distanza di prossimità dei sinkhole dalle depressioni.

Dati satellitari (INSAR e COSMO-SkyMed). I dati satellitari consentono l’analisi dei movimenti del suolo (abbassamenti/innalzamenti) rilevata dai benchmark radar PS (Persistent Scatterers) in termini di pattern spaziali e temporali di velocità (mm/anno). L’analisi dei dati può supportare la valutazione dei tassi di cedimento con precisione millimetrica nel tempo. L’analisi è stata effettuata su dati INSAR forniti dal Ministero della Transizione Ecologica (già Ministero dell’Ambiente) per il periodo 2005-2020, e su dati COSMO-SkyMed forniti dall’Agenzia Spaziale Italiana (ASI) per il periodo 2016-2021. Sia i dati INSAR sia COSMO-SkyMed sono stati elaborati utilizzando il Kriging Semplice (SK) al fine di ottenere una mappa stimata delle velocità di subsidenza alla risoluzione di 50 x 50 m.

Analisi dei pattern spaziali

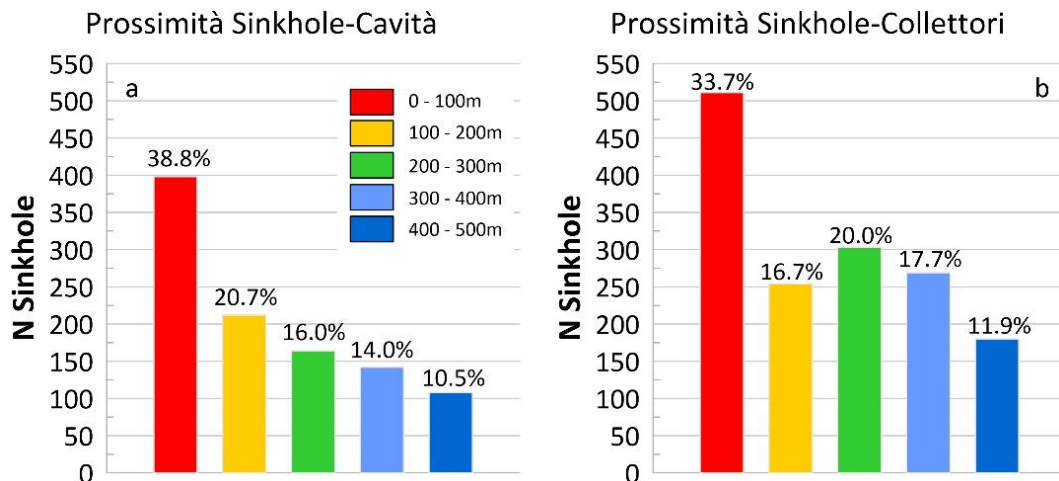
Layer	NNR	z-score	p-value	Distanza osservata (m)	Distanza attesa (m)	Pattern
Sinkhole	0.587	-15.967	0.000	90	150	Cluster
Cavità	0.473	-31.175	0.000	50	100	Cluster
Caditoie	0.588	-139.104	0.000	10	17	Cluster
Allagamenti	0.693	-5.622	0.000	223	321	Cluster
Collettori	0.983	-0.151	0.880	620	630	Casuale

Tabella 3. Risultati dell’analisi della distanza media di vicinaggio. NNR, Nearest Neighbour Ratio.

La distanza osservata è utilizzata come raggio di ricerca per l’elaborazione della mappa di densità.

Analisi di prossimità - La figura seguente mostra i diagrammi a barre relativi alla distanza di prossimità (Near Distance) tra i sinkhole e le cavità, le zone soggette ad allagamento, le depressioni morfologiche, e i collettori rispettivamente.

Per quanto riguarda in particolare la relazione di prossimità tra sinkhole e cavità sotterranee e sinkhole e depressioni morfologiche, è interessante notare come circa il 45% dei sinkhole (184 sinkhole su 410) sono localizzati entro 50 m dalla cavità più vicina, mentre circa il 63% (254/410) sono localizzati entro 100 m dalla cavità più vicina. Per quanto riguarda la relazione tra sinkhole e depressioni morfologiche circa il 51% dei sinkhole (211 sinkhole su 410) sono localizzati entro 50 m dalla cavità più vicina, mentre circa il 82% (331/410) sono localizzati entro 100 m dalla cavità più vicina.



Analisi di prossimità (Near Distance) tra la localizzazione dei sinkhole e le cavità sotterranee (a), e i collettori (b). Questi due fattori antropici costituiscono la causa maggiore della formazione di voragini in area urbana. I numeri sulle barre indicano la percentuale dei sinkhole nella relativa classe di distanza.

Mappe di densità

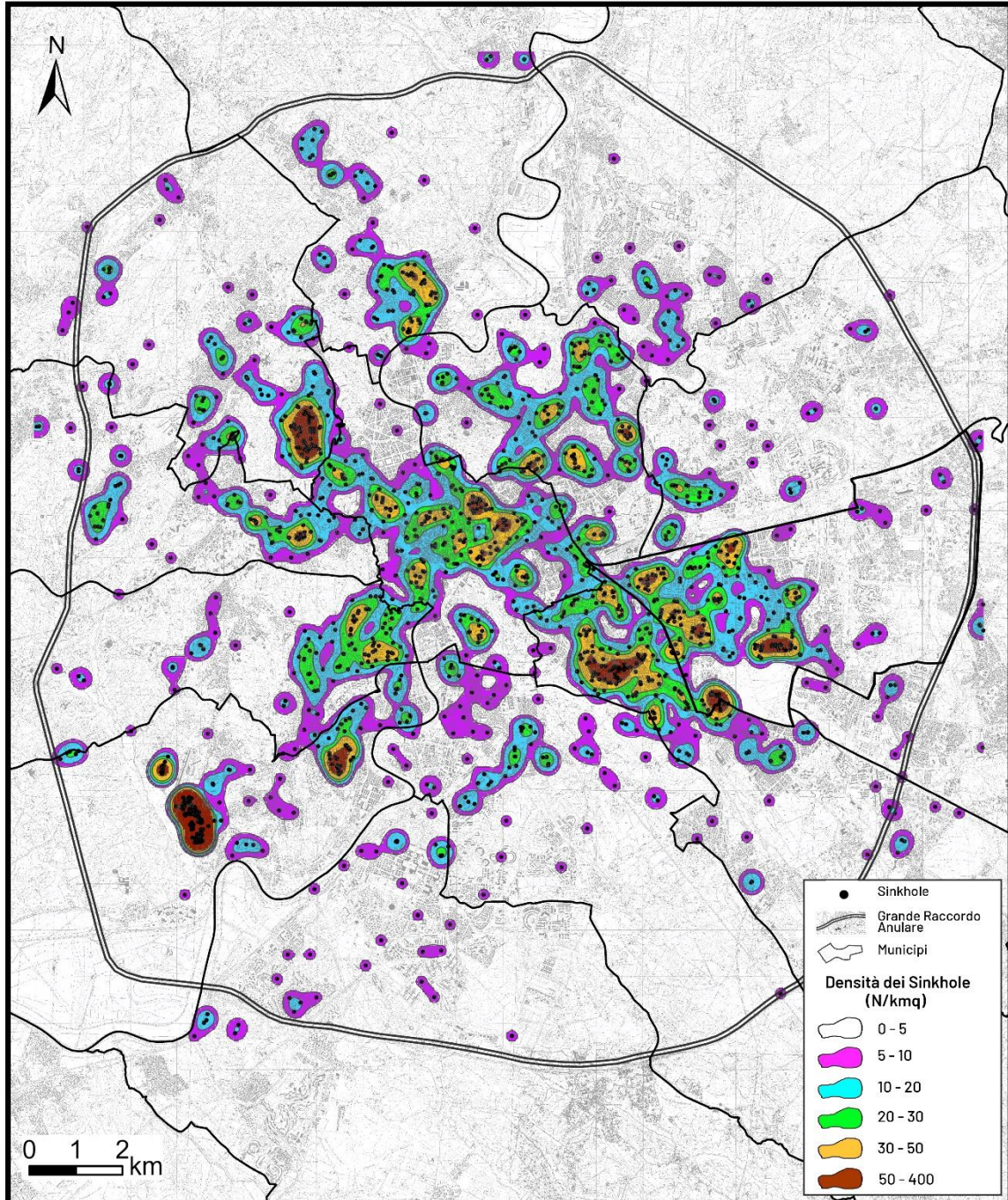
La figura seguente mostra le mappe di densità relative alla distribuzione dei sinkhole antropogenici, delle cavità sotterranee, delle zone suscettibili di allagamento, delle caditoie. La mappa di densità dei sinkhole può essere considerata, in via preliminare, una mappa di suscettibilità in quanto mostra le zone dove sono presenti i cluster più numerosi di voragini, e quindi le zone in cui questo fenomeno è più presente.

Carta della Densità dei Sinkhole

Nisio S.*, Ciotoli G.**, Annunziatellis A.*, Di Salvo C.**, Finoia M.G.*, Moretti P.*, Gaudiosi I.**, Pennica F.**, Stigliano F.**

*ISPRA **CNR-IGAG

Responsabile di Progetto Stefania Nisio ISPRA.



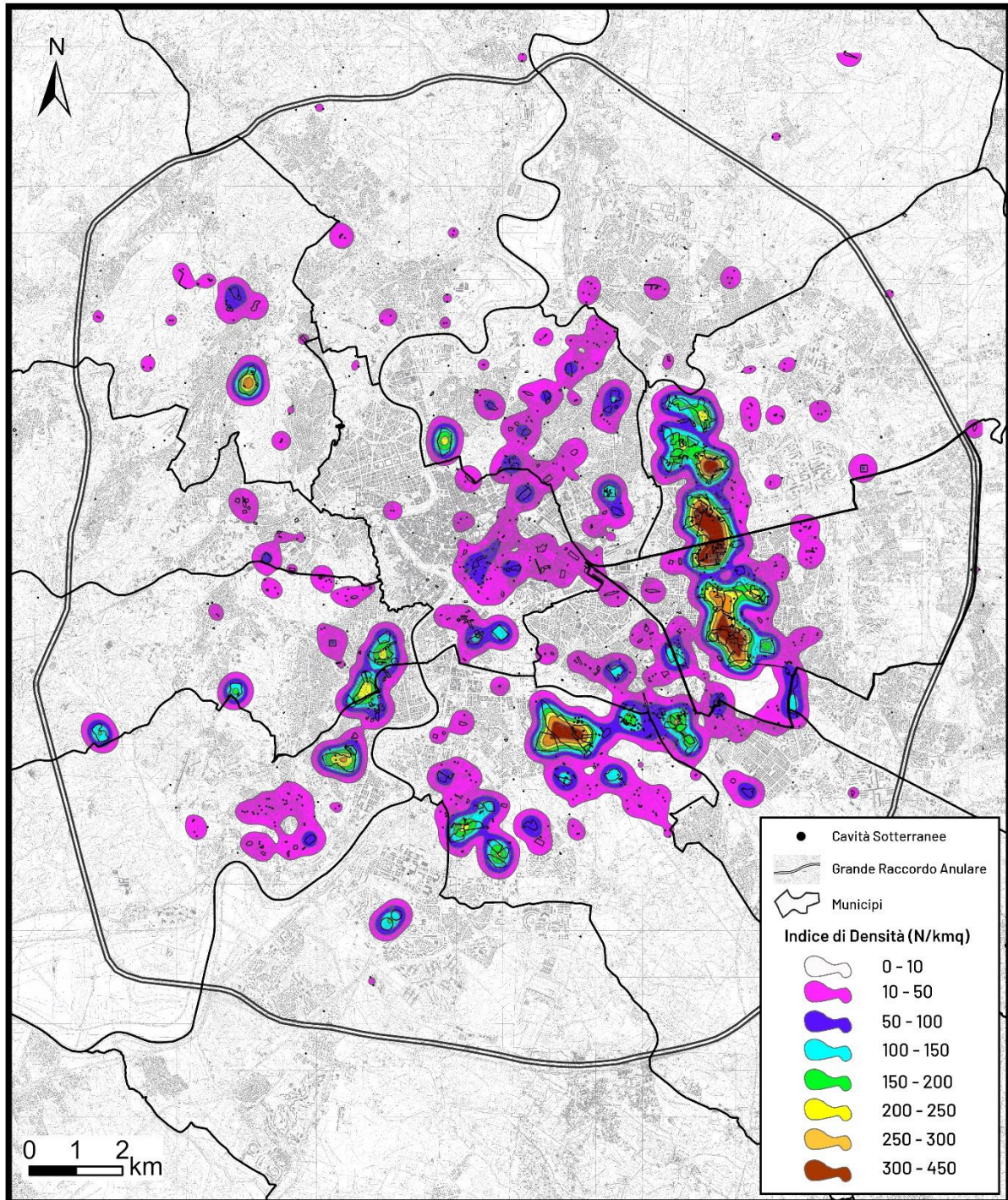
Mapa di densità di densità di sinkhole di Roma sino al GRA.

Carta della Densità delle Cavità Sotterranee di Roma

Nisio S.*, Ciotoli G.**, Annunziatellis A.*, Di Salvo C.**, Finoia M.G.*, Moretti P.*, Gaudiosi I.**, Pennica F.**, Stigliano F.**

* ISPRA ** CNR-IGAG

Responsabile di Progetto Stefania Nisio ISPRA.



Mappa di densità di cavità di Roma sino al GRA.

Mapa di suscettibilità

Il modello concettuale di suscettibilità include le variabili riportate nella tabella 4. La mappa di suscettibilità è stata costruita applicando il tool “Forest-based Classification and Regression” contenuto nel pacchetto Spatial Statistics di ArcGIS pro 3.02. Al layer dei sinkhole è stato applicato il comando “Extract Multi Value to Point” con il quale è stata creata una matrice di dati in cui in corrispondenza di ogni sinkhole è stato estratto il valore corrispondente del raster densità di sinkhole (variabile risposta) e di tutti gli altri raster (variabili esplicative): spessore dei riporti, profondità della falda, densità di caditoie, densità dei crateri di bombardamento, mappa dei dati INSAR e COSMO-Skymed. I layer poligonali relativi alle cavità sotterranee, agli allagamenti, alle depressioni morfologiche e ai collettori fognari sono stati inclusi nel modello di regressione come variabili esplicative espresse in termini di distanza dal sinkhole più vicino. La regressione è stata lanciata con l’indicazione di utilizzare il 30% dei dati come dati di test per la validazione del modello.

Il tool “Forest-based Classification and Regression” crea una serie di tabelle di output con alcuni parametri che permettono di fare valutazioni sulla bontà del modello. In particolare, sono calcolati l’errore medio standard (MSE) e R^2 del modello, quest’ultimo indica la percentuale di varianza spiegata. Entrambi i parametri si basano sulla capacità del modello di prevedere accuratamente il valore della variabile risposta in base ai valori osservati nel set di dati di training. Sia MSE che R^2 sono calcolati per il numero totale di alberi utilizzati (1000) e per la metà del numero di alberi utilizzati (500) per valutare se l’aumento del numero di alberi migliora le prestazioni del modello. Se gli errori e la percentuale di varianza spiegata sono simili per entrambi i numeri di alberi, ciò indica che è possibile utilizzare un numero inferiore di alberi con un impatto minimo sulle prestazioni del modello. Sebbene un elevato numero di alberi migliori la performance di un modello, in questo caso specifico la piccola differenza tra i valori di MSE e R^2 mostrano che il modello a 1000 alberi non si discosta molto da quello costruito con 500 alberi con minor tempo di elaborazione; entrambi i modelli spiegano circa il 70% della varianza totale (Tab. 4).

Numero di alberi	500	1000
MSE	715,095	704,080
% of varianza spiegata	70,020	70,482

Tabella 4. Parametri del modello.

Un altro fattore importante per la valutazione della performance del modello è rappresentato dalla dell’importanza relativa delle variabili esplicative utilizzate. L’importanza delle variabili può essere utilizzata per creare un modello più semplice (parsimonioso) che contenga le variabili ritenute più significative. La tabella 5 mostra in termini percentuali che delle 11 variabili esplicative inserite nel modello solo 7 risultano più significative, sono state escluse per ridondanza i dati COSMO-Skymed, le depressioni morfologiche, i crateri da impatto e la litologia. È importante notare che la presenza di cavità sotterranee costituisce il fattore principale legato alla formaione delle voragini in area urbana, laddove i dati INSAR stanno ad indicare zone in potenziale abbassamento. Anche i fattori legati alla circolazione idrica superficiale e sotterranea, come la distanza dalle zone suscettibili di allagamento e la profondità della falda, mostrano una certa importanza nel modello.

Le tabelle 5 e 6 mostrano i parametri diagnostici del modello di regressione ottenuti con i dati di training, e i parametri della diagnostica di validazione effettuata con i dati test (30% dei dati totali). Il modello elaborato con i dati di training mostra un coefficiente di regressione molto elevato ($R^2=0.961$), il modello risulta significativo ($p\text{-value}=0.000$) e mostra un errore standard molto basso.

Variabile	%
Cavità sotterranee	24
INSAR	19
Allagamenti	17
Profondità della falda	14
Spessore dei riporti	11
Collettori	8
Caditoie	7

Tabella 5
Parametri
diagnostici del
modello di
regressione

Dati di training		Dati di validazione	
R ²	0.961	R ²	0.760
p-value	0.000	p-value	0.000
Standard Error	0.007	Standard Error	0.022

Tabella 6 Parametri della diagnostica di validazione effettuata con i dati test

La figura successiva mostra la mappa di suscettibilità di Roma all'interno del GRA (Grande Raccordo anulare). Le zone più suscettibili (suscettibilità alta e molto alta) sono per la maggior parte localizzate nel settore orientale e sud-occidentale di Roma (municipi 4, 5, 7, 11, 12) che corrispondono ai quartieri Tiburtino, Prenestino, Casilino, Appio, Tuscolano, Portuense.

Suscettibilità	Area (km ²)
Molto Bassa	444
Bassa	136,8
Media	83,7
Alta	30,5
Molto Alta	9,4

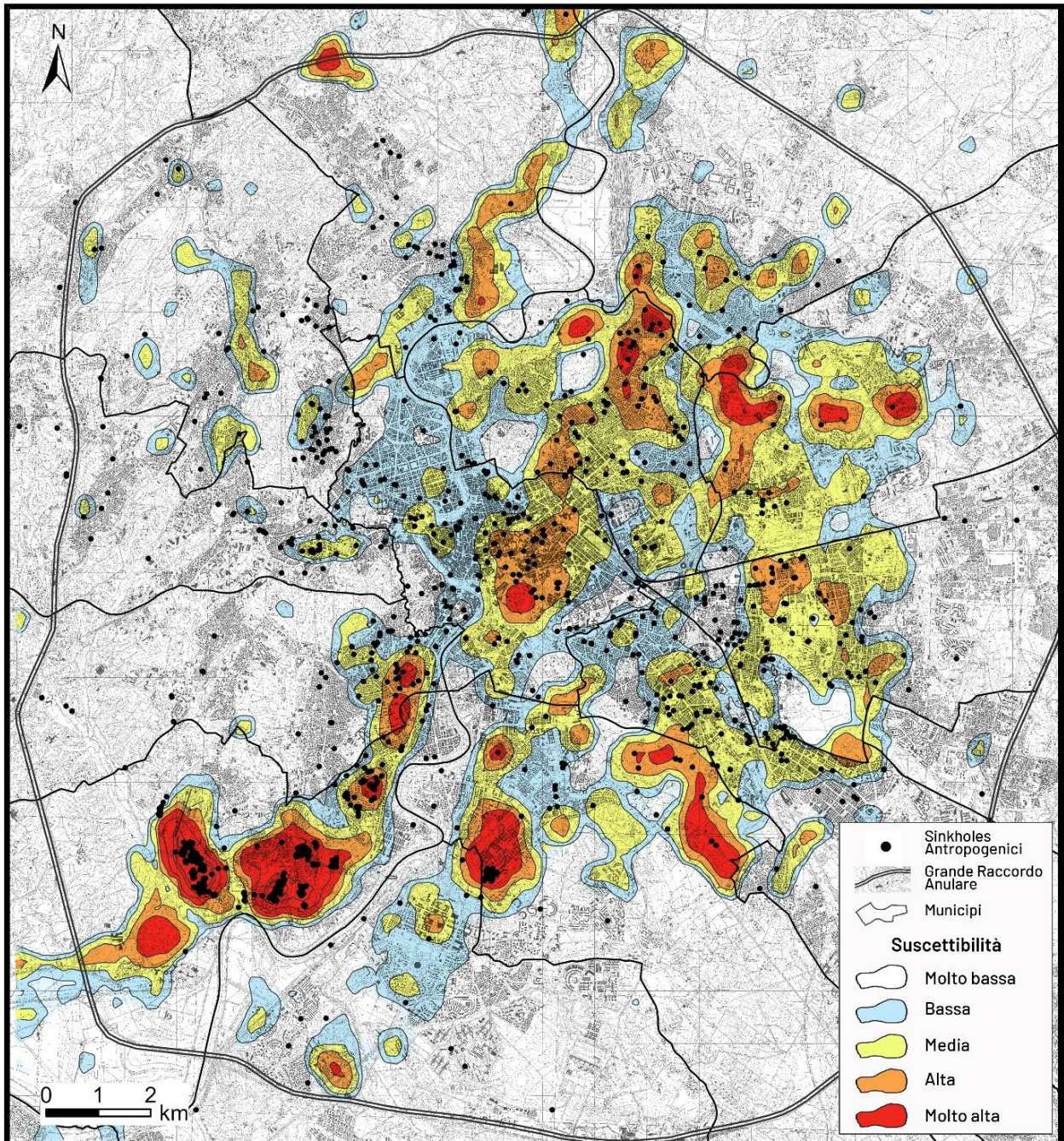
Tab 7 Area in Km2 del territorio di Roma, sottesa dalle varie classi di suscettibilità

Carta della Suscettibilità ai Sinkhole Antropogenici di Roma

Nisio S. *, Ciotoli G. **, Annunziatellis A. *, Finoia M.G. *, Moretti P. *, Gaudiosi I. **, Pennica F. **, Stigliano F. **

* ISPRA ** CNR-IGAG

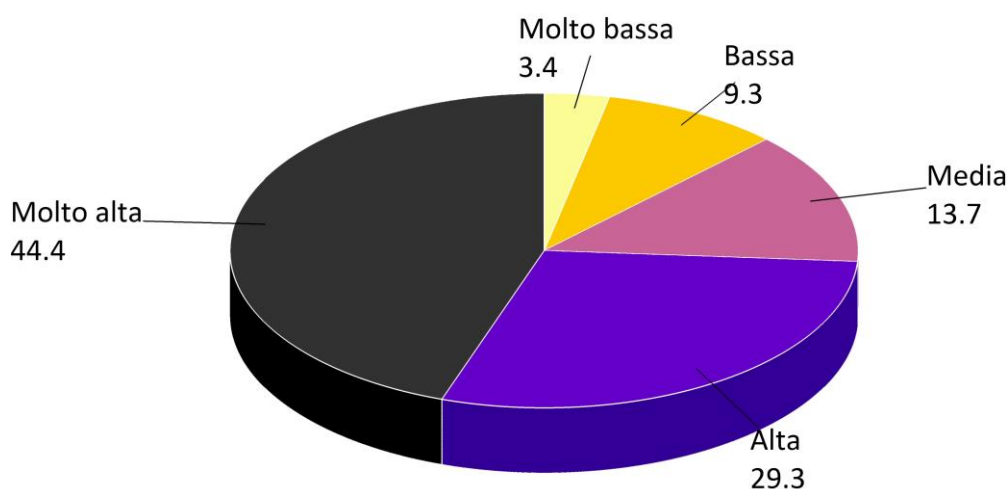
Responsabile di Progetto Stefania Nisio ISPRA.



Carta della suscettibilità ai sinkholes del territorio urbano di Roma sino al GRA

Le percentuali di sinkholes all'interno delle classi di suscettibilità sono riportate nel grafico seguente.

Percentuale di sinkhole nelle classi di suscettibilità



Percentuale di sinkhole nelle classi di suscettibilità.

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 quaranta 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 2022, ha messo in evidenza che più di 20 km² di territorio romano sono interessati da cavità sotterranee.

Il censimento dei sinkholes (più di 4000) ha permesso di realizzare una mappa di densità di sinkhole da cui si evince che buona parte del territorio romano (più di 40 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 verificato 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 2022, 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 di Roma (molto elevata) interessano un'area di 9.4 km²; le aree a suscettibilità elevata 30.5 km², le aree a suscettibilità media 83.7 km²; le aree a suscettibilità bassa 136.8 km², e le aree a suscettibilità molto bassa il restante 444 km² dell'area di studio. Sono stati, inoltre, confrontati gli eventi di sinkholes con i dati dell'abbassamento al suolo (InSAR anni 1992-2000 e con i dati Cosmo skymed per alcune aree di studio), escludendo la fascia del Tevere onde evitare interferenza degli abbassamenti. 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

- Anappo A. & Nisio S. (2021) - *La storia e le cavità sotterranee nei Monti del Trullo (Roma): la Grotta delle fate del ministro Baccelli*. Mem. Descrittive della carta geologica d'Italia. Vol 108
- Basso N., Ciotoli G., Finioia 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.
- Bersani P. & Nisio S (2021) - *Ipogei e i luoghi di culto nascosti sotto la Via Nomentana* Mem. Descrittive della carta geologica d'Italia. Vol 108
- Bisconti F., Ciotoli G., Ferri G., Fiore R., Lanzini M., Nisio S., Paolucci R., Roma M., Stranieri I., Succhiarelli C. Allevi M. (2018) - *Primo contributo alla realizzazione della carta delle cavità sotterranee di Roma*. SIGEA - Soc. It. di Geol. Amb., Geologia dell'Ambiente 4/2018, 15-22.
- Ciotoli G., Corazza A., Finioia 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., Finioia 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. (2021) - *La Via Campana-Portuense e le cavità sotterranee*. Geologia Ambientale, supp. 1/2021 Sigea 64-69.
- Ciotoli G. & Nisio S (2021) - *Le cavità sotterranee lungo la Portuense e il cimitero scomparso di San Felice*. Mem. Descrittive della carta geologica d'Italia. Vol 108
- Ciotoli G., Nisio S., Amanti M. (2016) - *La Suscettibilità di Roma ai sinkholes antropogenici*. professione Geologo, Ordine Geologi del lazio
- 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., Nisio S. (2018) - *Roma, vaste aree di cavità sotterranee scomparse. il caso della catacomba di san felice sulla via Portuense*. SIGEA - Soc. It. di Geol. Amb., Geologia dell'Ambiente 4/2018, 37-45.
- 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. (2015) - *Catalogo dei Sinkhole Antropogenici del Lazio 2013 ed organizzazione delle attività future*. (2015) Mem. Descr. Carta Geol. D'It. 99, 245-254. ISBN 978 – 88-9311-009-9
- 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.
- Nisio S. (2019) - *La Carta delle cavità Antropogeniche di Roma Capitale*. Quaderno Ordine degli ingegneri di Roma, pp. 20-31.
- Nisio S., Allevi A., Ciotoli G., Ferri G., Fiore R., Pascucci R., Stranieri I., Succhiarelli C., (2017) - *Carta delle Cavità sotterranee di Roma*. Pubblicazione 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.