

Allegato B - Sinkhole e cavità sotterranee – Linee guida per l'individuazione delle aree, la valutazione della pericolosità e le indagini sito specifiche

Sommario

Premessa.....	1
Classificazione degli sprofondamenti (sinkhole)	3
Cause predisponenti e innescanti	5
Fase 1 – Individuazione delle aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee	6
Fase 2 - Zonazione della pericolosità entro le aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee	8
Metodologia seguita nello studio pilota di “Aggiornamento del quadro conoscitivo relativo alla suscettività del territorio della provincia di Monza e della Brianza al fenomeno degli occhi pollini”	9
Metodologia seguita da ISPRA-Regione Lazio e CNR IGAG per l'analisi della suscettibilità ai sinkhole del territorio della Regione Lazio.	10
Fase 3 - Indagini da svolgere nelle aree ad alta pericolosità per la presenza/evoluzione di cavità sotterranee o nelle aree ove non sono state svolte zonazioni di pericolosità	12
Presentazione dei risultati relativi ad indagini sito-specifiche.....	15
Monitoraggio.....	16
Gestione delle acque meteoriche	16

Premessa

Con la finalità di migliorare l'azione regionale in tema di prevenzione dei rischi geologici, idrogeologici e sismici nella pianificazione territoriale, in attuazione dell'art. 55 “Attività regionali per il governo delle acque, la difesa del suolo e la prevenzione dei rischi geologici, idrogeologici e sismici” della l.r. 12/2005 “Legge per il governo del territorio”, anche attraverso l'implementazione del “Quadro regionale delle conoscenze sulla difesa del suolo e sul demanio idrico fluviale” di cui all'art. 6 della l.r. 4/2016 “Revisione della normativa regionale in materia di difesa del suolo, di prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico e di gestione dei corsi d'acqua”, è opportuno integrare i criteri attuativi dell'art. 57 della l.r. 12/2005 con indicazioni e linee guida relative all'analisi delle forme di dissesto denominate “sinkhole”, sprofondamenti generati da cavità sotterranee di origine naturale o antropica oppure da condizioni geologico-stratigrafiche favorevoli al loro sviluppo o evoluzione.

Su tale categoria di dissesto, a partire dal 2002, ISPRA ha avviato a livello nazionale un'attività di ricerca, valutazione e mappatura, che ha portato alla realizzazione di un catalogo specifico, il “Database Nazionale dei Sinkhole”, attraverso:

- studi sui processi genetici che portano alla loro formazione in relazione ai diversi contesti geologico-strutturali, geomorfologici e idrogeologici;
- linee guida per la loro classificazione;

- messa a punto di una scheda per la catalogazione.

Relativamente alla Lombardia, il Database Nazionale dei Sinkhole include attualmente la rappresentazione di 109 sinkhole/cavità, distribuiti lungo la valle del Po, tra la Val Seriana e la Val Cavallina, nell'Alta pianura lombarda (Provincia di Monza e della Brianza).

Anche l'Inventario nazionale dei fenomeni franosi (IFFI), realizzato da ISPRA in collaborazione con le Regioni, include, tra le categorie di frane rappresentate, gli "sprofondamenti" e le "aree con sprofondamenti diffusi". In tale inventario, relativamente al territorio lombardo sono attualmente rappresentate 44 aree di questo tipo che interessano il territorio dei Comuni di Santa Brigida, Rogno, Esine, Piario, Clusone, Costa Volpino, Medolago e Lovere (sprofondamenti), Taceno, Lovere, Idro e Pessina Cremonese (aree con sprofondamenti diffusi) dovute nella maggior parte dei casi alla presenza nel sottosuolo di litotipi potenzialmente soggetti a fenomeni di dissoluzione (depositi evaporitici) anche oggetto nel passato di coltivazione mineraria o di cava. L'individuazione di tali aree deriva in gran parte dalle componenti geologiche dei PGT.

Alcune delle aree rappresentate nell'IFFI compaiono quali aree a rischio idrogeologico molto elevato nell'Allegato 4.1. all'Elaborato 2 "Atlante dei dissesti idraulici e idrogeologici" del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del bacino del Fiume Po (PAI) (es. area RME 147 LO-BG - Santa Brigida).

I tre quadri conoscitivi sopracitati contengono per la Lombardia una rappresentazione molto parziale del fenomeno, ed è pertanto opportuno implementarli.

Ad esempio, tra i contesti lombardi ove sono presenti condizioni geologiche favorevoli al verificarsi di sprofondamenti è sicuramente da considerare, a causa della sua estensione e del grado di urbanizzazione presente, la fascia di territorio denominata "Alta Pianura" ed in particolare la zona compresa tra i fiumi Adda e Ticino. Caratteristici di quest'area sono i cosiddetti "occhi pollini", cavità sotterranee che possono portare a sprofondamenti improvvisi del terreno con coinvolgimento delle sovrastrutture.

In questo territorio, a seguito di un evento di sprofondamento verificatosi in Comune di Bernareggio (MB) il 14 giugno 2016, attraverso un accordo stipulato tra Provincia di Monza e della Brianza, ATO Monza e Brianza e BrianzAcque, è stato avviato uno studio "pilota" finalizzato alla zonazione di dettaglio della pericolosità rispetto al fenomeno degli "occhi pollini". Tale accordo è parte di un progetto più ampio che coinvolge la Prefettura di Monza e Brianza, i Comuni della Provincia e Regione Lombardia la quale, attraverso la stipula di una specifica convenzione con ISPRA, si è impegnata ad aggiornare il Data Base Nazionale dei Sinkhole con i dati prodotti nello studio pilota e ad integrare la tematica negli Indirizzi e criteri per la redazione della componente geologica dei PGT attraverso la messa a punto di linee guida, con il supporto scientifico di ISPRA.

Il presente documento include:

- la classificazione dei sinkhole proposta da ISPRA in base alla casistica italiana, con specifici riferimenti ad esempi rilevati sul territorio lombardo;

- l'approccio da seguire nella componente geologica dei PGT o in studi d'area vasta per l'individuazione delle aree potenzialmente esposte alla problematica;
- l'illustrazione sintetica della metodologia messa a punto per la zonazione della pericolosità, rispetto al fenomeno degli occhi pollini, nel territorio della Provincia di Monza e della Brianza, quale riferimento per studi da svolgere a scala comunale o sovracomunale;
- l'illustrazione sintetica della metodologia seguita da ISPRA, Regione Lazio e CNR-IGAG per la redazione di una Carta di suscettibilità ai Sinkholes basata sull'analisi geo-statistica, quale ulteriore riferimento per studi da svolgere ad ampia scala;
- linee guida da seguire per le indagini da svolgere in sede attuativa in aree ad elevata pericolosità per la potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee. Tali linee guida traggono spunto dalla bibliografia sul tema raccolta da ISPRA e dagli indirizzi già in vigore in altre Regioni (es. Regione Sardegna, Regione Lazio).

Classificazione degli sprofondamenti (sinkhole)

Secondo la classificazione proposta da ISPRA (Fig. 1) in base alla casistica italiana, i sinkhole o potenziali sinkhole possono essere suddivisi in due grandi categorie: **naturali e antropogenici**.

I **sinkhole naturali** sono voragini, generalmente di forma sub-circolare con diametro variabile da alcuni metri a poche centinaia di metri. Il processo di formazione della voragine è in genere rapido ed avviene nell'arco di poche ore. Il sinkhole può essere colmato rapidamente da acqua di falda o di risalita trasformandolo nell'arco di un certo periodo di tempo in un piccolo lago. I sinkhole naturali possono essere suddivisi, in base ai processi genetici, nelle seguenti categorie:

- a) Sinkhole di origine carsica:** questi fenomeni corrispondono alle doline, che si originano per fenomeni solamente carsici di dissoluzione della roccia. I meccanismi che determinano la formazione della cavità in superficie sono i seguenti:
 - la sola dissoluzione o *solution*
 - la lenta subsidenza o *subsidence*
 - il crollo o *collapse*.
- b) Sinkhole di suffosione superficiale:** si tratta di cavità di forma circolare che si realizzano in terreni sciolti per fenomeni di erosione dal basso con formazione di condotti verticali e/o sub-orizzontali che possono interessare i primi metri della copertura eluviale colluviale e/o i terreni sciolti sottostanti. In questa categoria sono stati classificati gli "occhi pollini", sinkhole potenzialmente in evoluzione, corrispondenti a cavità od orizzonti di debolezza sotterranei presenti nell'alta pianura lombarda fino a profondità di circa 20 metri che, pur non manifestando necessariamente evidenze superficiali, potrebbero evolvere in tal senso fino allo sprofondamento;
- c) Sinkhole per piping:** caratteristica distintiva è un meccanismo profondo di erosione dal basso che investe spessori notevoli di copertura. Questa tipologia è rappresentata da cavità colmate d'acqua, attraverso il processo di

annegamento, che si aprono su coperture a granulometrie variabili ma prevalentemente fini (argille siltose o limi con spessori superiori ai cento metri) impermeabili o semipermeabili, in cui è improbabile una filtrazione verso il basso. Ciò che distingue questi sinkhole, è il fatto che l'acqua di riempimento, mineralizzata e con risalita di gas, presenta una prevalenza tale da renderla a volte artesianica al piano campagna o al di sopra di esso, generando quindi delle sorgenti. La coesistenza di acque mineralizzate e di emissioni gassose, sostanzialmente riconducibili a CO₂, H₂S, assente o limitata nei sinkhole classificati nelle altre categorie, induce ad invocare un modello genetico ed evolutivo che si discosta da quelli comunemente accettati. Si può ipotizzare un ruolo attivo e di primo piano svolto dal "fattore A/G" (Artesianismo/Gas), sia nella genesi che nello sviluppo di questo tipo di fenomeni. In particolare, si pensa che, al momento della formazione di questi fenomeni, la risalita di acque miscelate a gas di origine profonda possa aver meccanicamente contribuito in maniera determinante all'attivazione degli sprofondamenti. In Regione Lombardia, al momento, non sono noti fenomeni di questo tipo;

d) Sinkhole di evorsione: sono relativi a processi erosivi provocati da turbolenze ad asse verticale (dall'alto verso il basso), mulinelli, che si verificano generalmente in grandi pianure alluvionali (es. Pianura Padana) in seguito a rotte arginali, denominati anche "bugni", "gorghi", "laghetti di rotta". Le forme risultanti da tali processi possono essere depressioni asciutte o laghetti sub-circolari in aree di pianura, di dimensioni osservate con diametri variabili da 30 a 100 m e profondità fino a un massimo di 13 -15 m. Tali forme risultano collocate ove si può ritenere che si sia prodotta la confluenza di notevoli quantità d'acqua, ai piedi di un argine fluviale in corrispondenza di una rotta, o in un territorio depresso nel luogo di convogliamento di acque tracimate, oppure in punti in cui queste hanno dovuto attraversare strutture lineari come argini, dossi, cordoni litoranei. Queste cavità si formano su terreni in cui è presente una grande percentuale di sabbia. In tali condizioni possono anche associarsi processi di *suffosione superficiale* e sifonamento; infatti, in condizioni di elevata pressione idrostatica, in tali ambienti e negli stessi punti, è anche frequente la formazione di "fontanazzi".

I **sinkhole antropogenici** sono voragini di forma e dimensioni varie, originate dalla presenza di un vuoto sotterraneo (cavità) realizzato dall'uomo per un particolare fine (es. cave/miniere sotterranee costituite da reti di gallerie a volte non bonificate dopo il loro utilizzo) o generatosi indirettamente a causa di attività umane (es. dilavamento dei terreni sciolti al di sotto del manto stradale dovuto a disfunzioni della rete dei sottoservizi) o dal sommarsi di entrambe le cause.

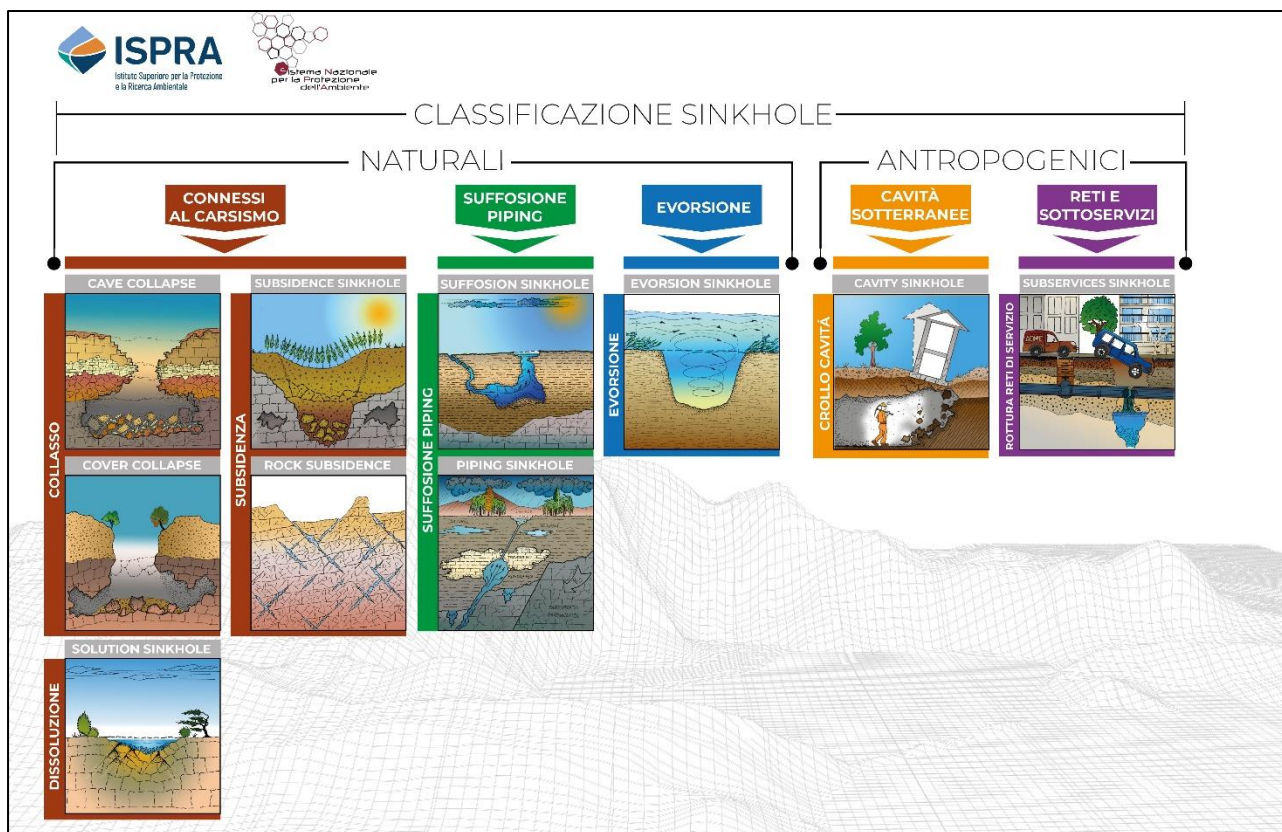


Fig. 1 – Classificazione sinkhole secondo ISPRA

Cause predisponenti e innescanti

I *sinkhole* si originano in contesti di complesse situazioni geologico-strutturali ed idrogeologiche del territorio che ne costituiscono le cause predisponenti. Vengono innescati per motivi di diversa natura quali un sisma, un periodo di siccità, o una alluvione o l'emungimento di grandi quantitativi di acqua dal sottosuolo che possono provocare variazioni rapide del livello piezometrico.

Le cause, molteplici e spesso concomitanti, possono essere appunto distinte in predisponenti ed innescanti il fenomeno, così come di seguito riassunte in via indicativa e non esaustiva:

Cause predisponenti

- presenza di un substrato carbonatico o costituito da roccia solubile (calcari, dolomie, evaporiti o rocce solfatiche) sottoposto a fenomeni carsici; presenza di una morfologia del *bedrock* accidentata, sia a piccola che a grande scala, con macroforme carsiche (*doline*, *uvala*, *crepacci* e *grotte*) e con cavità carsiche presenti al tetto del substrato (interfaccia suolo/roccia) risultato di processi corrosivi e pedogenetici per i sinkhole di origine carsica e per piping;
- presenza di un pacco di sedimenti impermeabili o semi-permeabili al tetto del substrato costituito da limi, argille, sabbie a differente granulometria omogenee o eterogenee per i sinkhole di evorsione e per piping;

- Scadenti caratteristiche fisico-meccaniche (consolidazione, addensamento, resistenza) dei materiali costituenti il manto superiore per i sinkhole di evorsione e per piping;
- presenza di un reticolo di fratture o faglie che permettano una maggiore circolazione idrica e una notevole erosione meccanica per i sinkhole di evorsione, suffosione, piping e carsici;
- presenza di abbondanti acque di circolazione sotterranea per i sinkhole di suffosione superficiale, piping e carsici;
- presenza di gas nel sottosuolo, generalmente CO₂ e H₂S, che consentano la dissoluzione dei materiali di copertura e la risalita delle acque per i sinkhole di piping;
- scarsa presenza di un manto vegetale che possa esercitare un effetto limitante nei confronti della mobilitazione dei terreni;
- presenza di cavità sotterranee di origine antropica (siti minerari/aree interessate da attività estrattive passate) per i sinkhole antropogenici.

Cause innescanti

- intensità elevata delle precipitazioni piovose e alternanza di periodi secchi e piovosi con conseguente incremento della circolazione d'acqua nel sottosuolo, oscillazioni del livello piezometrico, ecc;
- scosse sismiche;
- carichi superficiali;
- attività antropiche (estrattive, emungimenti di acqua, etc.). Il forte emungimento per uso irriguo ed idropotabile fa sì che si sviluppino, in prossimità dei pozzi, coni di depressione tali da far aumentare notevolmente la velocità dei flussi idrici e quindi l'asportazione delle particelle dei sedimenti e la subsidenza delle coperture alluvionali.

Maggiori informazioni sulla classificazione, sulle cause predisponenti e sui fattori innescanti sono reperibili sul sito ISPRA, periodicamente aggiornato, al quale si rimanda (<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/sinkholes-e-cavita-sotterranee>). Al medesimo sito si rimanda anche per l'indicazione della bibliografia di riferimento sul tema sinkhole.

Fase 1 – Individuazione delle aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee

Il manifestarsi in superficie di fenomeni di sprofondamento, connessi alla presenza o all'evoluzione di cavità sotterranee, è da ricondurre ai diversi fattori predisponenti e innescanti elencati in precedenza.

Vi sono pertanto delle aree ove questi fattori sono prioritariamente presenti, ad esempio:

- siti minerari/aree interessate da attività estrattive passate;
- siti archeologici;
- aree carsiche;

- aree con presenza di litotipi potenzialmente soggetti a fenomeni di dissoluzione (depositi evaporitici);
- aree con condizioni favorevoli allo sviluppo di occhi pollini; a tale scopo si invita a far riferimento allo studio pilota di "Aggiornamento del quadro conoscitivo relativo alla suscettività del territorio della provincia di Monza e della Brianza al fenomeno degli occhi pollini";
- aree individuate da indagini stratigrafiche preesistenti o indagini geognostiche realizzate *ad hoc* con presenza di livelli/orizzonti a scadenti caratteristiche geotecniche, oppure con cavità vere e proprie, a profondità potenzialmente interferenti con le fondazioni (o anche superiore);
- aree con evidenze di variazioni plano-altimetriche del suolo, ove si sono osservate lesioni/cedimenti negli edifici, nei sottoservizi e nelle sovrastrutture e ove si sono verificati eventi di sprofondamento pregressi.

L'individuazione delle aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee rientra nella fase di analisi per la redazione/aggiornamento della componente geologica Idrogeologica e sismica del PGT, nell'ambito della quale il territorio comunale viene inquadrato dal punto di vista geologico, geomorfologico, idrogeologico, stratigrafico e strutturale.

In tale fase devono essere consultate le banche dati tematiche disponibili sul Geoportale della Lombardia quali, in particolare, le seguenti: [Cartografia geologica \(Progetto CARG\)](#), [Banca Dati Geologica di Sottosuolo](#), [Dati interferometria radar](#), [Suscettività al fenomeno degli occhi pollini nel territorio di Monza e della Brianza](#), [Inventario dei fenomeni franosi \(IFFI\)](#) oltre al [Database nazionale dei sinkhole e ad altri quadri conoscitivi di riferimento che verranno messi a disposizione a tale scopo attraverso il Geoportale della Lombardia](#).

Se nel territorio in esame si sono verificati in passato eventi di dissesto legati a fenomeni di sprofondamento, la fase di ricerca storica e bibliografica dovrà includere la raccolta delle informazioni relative a tali eventi, la loro descrizione e catalogazione utilizzando la scheda proposta da ISPRA e riportata nell'Allegato B1, nonché la loro georeferenziazione e rappresentazione nella cartografia di analisi. La compilazione della scheda è soprattutto funzionale alla caratterizzazione e classificazione del fenomeno (cause predisponenti, innescanti e possibile evoluzione del fenomeno), dalle quali discende la scelta delle tecniche di intervento e di monitoraggio.

In assenza di manifestazioni superficiali di sprofondamento, ma in presenza nel sottosuolo di condizioni favorevoli alla loro formazione/evoluzione, l'indagine storica e bibliografica dovrà includere la ricerca di eventuali segni premonitori quali evidenze di movimenti del suolo e di lesioni sugli edifici esistenti, con interviste ai tecnici comunali, ai gestori del servizio idrico integrato, agli abitanti e con consultazione della bibliografia locale (archivi comunali, parrocchiali), nonché acquisizione di informazioni presso gli enti competenti all'attività mineraria con particolare riferimento ad attività estrattive in sotterraneo.

All'interno delle aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee, nell'ambito della componente geologica del PGT è opportuno che, oltre alla loro individuazione, siano sviluppati studi di approfondimento finalizzati ad una zonazione della pericolosità. Tali studi sono obbligatori qualora le aree individuate interferiscano con l'edificato esistente o di progetto in particolare quando sia prevista la realizzazione di nuovi edifici strategici e rilevanti (D.d.u.o. 22 maggio 2019, n. 7237) oppure qualora le aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee interessino l'intero territorio comunale o aree vaste, com'è il caso dell'alta pianura lombarda (N.B. Il territorio della Provincia di Monza e Brianza dispone già di una zonazione della pericolosità a scala provinciale).

Qualora tali studi non vengano realizzati in fase di redazione/aggiornamento della componente geologica dei PGT, nella carta di fattibilità geologica delle azioni di piano, dovrà essere attribuita una classe di fattibilità geologica 3 (consistenti limitazioni) e nelle norme geologiche di piano dovranno essere previste obbligatoriamente, in fase attuativa, le indagini di approfondimento indicate nel seguito (Fase 3), che potranno evidenziare l'impossibilità di trasformazioni dell'uso del suolo oppure la loro possibilità, condizionata, ad esempio, nella modalità di realizzazione delle fondazioni o nella necessità di preventivi interventi di consolidamento del sottosuolo.

In caso di svolgimento degli studi di zonazione di dettaglio della pericolosità, potranno essere adottate più sottoclassi o classi differenti: classe di fattibilità 2, per le aree a minor pericolosità di dettaglio; classe di fattibilità 4 per le aree entro le quali la valutazione di dettaglio della pericolosità ha evidenziato l'impossibilità di trasformazioni d'uso del suolo.

Fase 2 - Zonazione della pericolosità entro le aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee

La zonazione di dettaglio della pericolosità è obbligatoria in fase di redazione/aggiornamento della componente geologica del PGT:

- qualora le aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee delimitate nella Fase 1 interessino l'intero territorio comunale o aree vaste, com'è il caso dell'alta pianura lombarda. Si evidenzia che tale zonazione, per il territorio della Provincia di Monza e della Brianza, è già disponibile negli studi svolti a scala provinciale ed è di riferimento obbligatorio;
- qualora entro le aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee delimitate nella Fase 1:
 - o ricadano aree già edificate, per le quali si condurrà anche una valutazione di dettaglio del rischio;
 - o sia prevista la realizzazione di nuovi edifici, soprattutto se strategici e rilevanti (D.d.u.o. 22 maggio 2019, n. 7237).

Quale metodologia per la realizzazione degli studi finalizzati alla zonazione della pericolosità entro le aree a potenziale presenza/evoluzione di cavità sotterranee, si riporta:

- la metodologia seguita nello studio pilota di “Aggiornamento del quadro conoscitivo relativo alla suscettività del territorio della provincia di Monza e della Brianza al fenomeno degli occhi pollini”.
- la metodologia seguita da ISPRA-Regione Lazio e CNR IGAG per l'analisi della suscettibilità ai sinkhole del territorio della Regione Lazio.

Di queste metodologie si riporta di seguito una sintesi descrittiva.

Metodologia seguita nello studio pilota di “Aggiornamento del quadro conoscitivo relativo alla suscettività del territorio della provincia di Monza e della Brianza al fenomeno degli occhi pollini”

Lo studio pilota finalizzato alla zonazione di dettaglio della pericolosità dovuta al fenomeno degli “occhi pollini” è stato condotto nell'ambito di un accordo stipulato tra Provincia di Monza e della Brianza, ATO Monza e Brianza e BrianzAcque. La prima fase si è completata nel 2020 ed ha riguardato i 15 comuni più orientali del territorio della Provincia di Monza e della Brianza; nel 2022 si è completata la seconda fase che riguarda i restanti Comuni della Provincia. Come già anticipato, il lavoro rientra in un progetto più ampio che vede la partecipazione anche della Prefettura di Monza e Brianza, dei Comuni della Provincia e di Regione Lombardia, che a sua volta ha stipulato una convenzione con ISPRA, per l'alimentazione, con i dati prodotti nello studio, del Data Base Nazionale dei Sinkhole.

Lo studio ha aggiornato e approfondito la precedente individuazione e zonazione delle aree suscettibili al fenomeno degli occhi pollini condotta nel 2011, prevalentemente sulla base della cartografia geologica di superficie, e recepita nel PTCP di Monza e Brianza, che ha anche incluso linee guida per gli approfondimenti da svolgere da parte dei Comuni.

Lo studio ha incluso le seguenti fasi¹:

- Ricostruzione geologica di superficie e di sottosuolo utilizzando la cartografia geologica alla scala 1:50.000 e 1:10.000 prodotta nell'ambito del Progetto CARG;
- Ricostruzione idrogeologica;
- Inquadramento bibliografico relativa al tema “occhi pollini”;
- Raccolta dati storici relativi ad eventi di sprofondamento che hanno raggiunto la superficie con aperture di voragini o abbassamenti della superficie del terreno o che sono stati messi in luce durante l'apertura di scavi, o ancora che hanno interessato i sottoservizi attraverso interviste con tecnici delle amministrazioni locali, gestori del servizio idrico integrato e analisi delle componenti geologiche degli strumenti urbanistici comunali;
- Raccolta capillare di dati stratigrafici preesistenti relativi a indagini dirette (sondaggi, pozzi) e indirette (prove penetrometriche statiche, dinamiche, indagini geoelettriche, indagini sismiche tipo Masw) dalle seguenti fonti:

¹ Lo studio completo è disponibile sul [sito istituzionale della Provincia di Monza e della Brianza](#) e sul [sito di Regione Lombardia](#)

- Banca Dati geologica di sottosuolo regionale costruita nell'ambito del Progetto CARG e integrata con i dati derivanti dalle componenti geologiche dei PGT dei Comuni;
- Relazioni geologiche e geotecniche redatte ai sensi delle Norme Geologiche di Piano comunali e delle Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 17 gennaio 2018) stilate successivamente al 2011 (data dello studio utilizzato nel vigente PTCP);
- Georeferenziazione delle indagini, catalogazione, normalizzazione e analisi integrata dei dati stratigrafici raccolti con individuazione e ricostruzione di livelli a potenziale presenza di occhi pollini in profondità e arealmente;
- Analisi delle relazioni tra distribuzione dei livelli a potenziale presenza di occhi pollini, geologia di sottosuolo, di superficie, relazioni con la falda;
- Rappresentazione cartografica della pericolosità rispetto al fenomeno degli occhi pollini utilizzando 4 classi: H4-alta, H3-media, H2-moderata e H1- bassa in base al contesto geologico di superficie e di sottosuolo ricostruito in base ai dati disponibili e tenendo in considerazione il modello genetico di sviluppo delle cavità;
- Rappresentazione cartografica del rischio attraverso l'attribuzione di un valore di danno coerente con quello indicato nell'Allegato 4 alla d.g.r. 2616/2011 per gli studi di approfondimento entro le aree esposte al rischio idraulico, e vulnerabilità a ciascuna categoria di uso del suolo, utilizzando la banca dati DUSAF, il Data Base Topografico della Regione Lombardia e le più recenti mappature elaborate ai fini della redazione della carta del consumo di suolo ai sensi della l.r. 31/2014 nell'aggiornamento 2022; Valutazione del rischio per gli ambiti di trasformazione previsti nei PGT vigenti dei Comuni;
- Definizione di indirizzi preliminari finalizzati a migliorare l'azione di prevenzione del rischio legato alla possibile presenza o insorgenza di occhi pollini, definiti tenendo conto del diverso grado di pericolosità, e articolati in azioni rivolte alla migliore identificazione delle caratteristiche geotecniche dei terreni e azioni rivolte alla gestione delle acque meteoriche allo scopo di limitare l'insorgenza e/o lo sviluppo del fenomeno.
- Tra gli indirizzi relativi all'esecuzione delle indagini, viene indicata ad esempio la necessità di indagini specifiche anche nel caso di costruzioni o di interventi di modesta rilevanza, che ricadano in zone ben conosciute dal punto di vista geotecnico, a maggior cautela rispetto alle NTC2018 - par. 6.6.2. se ricadenti in aree classificate come H4 e H3; viene indicata la profondità alla quale vanno spinte le indagini nelle diverse zone, vengono indicati vantaggi e svantaggi di diversi metodi di indagine diretta e indiretta in relazione alla problematica degli occhi pollini.

Metodologia seguita da ISPRA-Regione Lazio e CNR IGAG per l'analisi della suscettibilità ai sinkhole del territorio della Regione Lazio.

Nell'ambito di una collaborazione attivata tra ISPRA, Regione Lazio e CNR-IGAG è stato condotto uno studio della Suscettibilità ai sinkholes di origine naturale sul

territorio del Lazio che ha portato alla redazione della Carta di suscettibilità ai Sinkholes del Lazio basata sull'analisi geo-statistica². La raccolta complessiva dei dati (cartografici, di letteratura e inediti) ha permesso di individuare 33 aree a rischio con un totale di 393 sinkholes censiti, attivi, ricolmati o estinti.

La valutazione della suscettibilità è stata effettuata utilizzando alcuni parametri ambientali (litologia, profondità del substrato, permeabilità, piezometria, sorgenti dolci minerali, termominerali e loro portata, punti di emissione di gas del sottosuolo, faglie e faglie attive, epicentri ed intensità dei terremoti, doline, uso del suolo, gravimetria) che si ritiene possano entrare in gioco nel processo di formazione di un sinkhole e attraverso l'assegnazione di un peso ad ogni elemento. I risultati sono stati espressi in termini di probabilità che il fenomeno si manifesti nello spazio (considerando un tempo infinito). Il calcolo dei pesi che sono stati assegnati a ciascuno dei fattori predisponenti è stato basato su l'applicazione di una tecnica statistica multivariata: la regressione logistica binaria.

Il territorio del Lazio, i cui fenomeni di sinkhole più peculiari si manifestano nelle aree di pianura, è stato pertanto zonato sulla base della sua suscettibilità al fenomeno sinkhole.

Le aree maggiormente suscettibili sono risultate alcune aree di piana alluvionale o costiera, conche intramontane, in cui il substrato carbonatico è ribassato da faglie di importanza regionale che favoriscono la circolazione di fluidi e gas. Alcuni fenomeni di sinkholes sono connessi al carsismo sub-superficiale che si verifica su vaste aree di affioramenti di travertino. In quest'ultimo caso le aree nel Lazio maggiormente interessate dai tali fenomeni sono la Piana delle Acque Albule in provincia di Roma e la Piana di Viterbo.

Le più peculiari conche intramontane laziali suscettibili al fenomeno sono state studiate con maggiore dettaglio. La Piana di S. Vittorino presso Cittaducale, in provincia di Rieti, ad esempio, è tra le aree suscettibili, più didattiche e studiate in tutto il territorio italiano. Nella provincia di Frosinone sono casi di studio la Piana di Sora, l'area di Posta Fibreno, la Piana di Cassino. Molti fenomeni di sinkholes si sviluppano nella pianura costiera Pontina in provincia di Latina.

I meccanismi di formazione possono essere ricondotti a processi profondi di erosione dal basso e di dissoluzione facilitata da fluidi in pressione all'interno di un reticolo di faglie e fratture attive che attraversano la copertura.

Per maggiori informazioni relative al metodo utilizzato, si rinvia al sito istituzionale ISPRA.

² CIOTOLI G. (*), DI LORETO E. (**), LIPERI L. (**), MELONI F. (**), NISIO S. (*), SERICOLA A. (**) - Carta dei sinkholes del Lazio 2012 e sviluppo futuro del progetto sinkhole - Mem. Descr. Carta Geol. D'It. XCIX (2015), pp. 189 – 202.

Fase 3 - Indagini da svolgere nelle aree ad alta pericolosità per la presenza/evoluzione di cavità sotterranee o nelle aree ove non sono state svolte zonazioni di pericolosità

Entro le aree che, a seguito della zonazione di dettaglio della pericolosità svolta nella Fase 2, risultino a maggior pericolosità oppure entro le aree individuate nella Fase 1, qualora non venga svolta una zonazione di dettaglio della pericolosità nell'ambito della componente geologica del PGT, le norme geologiche di piano devono obbligatoriamente prevedere, nella fase attuativa degli interventi, anche di tipo infrastrutturale, approfondimenti che dovrebbero includere i seguenti elementi:

1. **inquadramento di dettaglio dell'area di studio** dal punto di vista geologico, geomorfologico, idrogeologico, stratigrafico e strutturale;
2. **indagine locale** su eventuali fenomeni di sprofondamento verificatisi sull'area e in un intorno significativo, su evidenze di movimenti della superficie e su lesioni sugli edifici esistenti nell'area e nelle zone limitrofe, con interviste ai tecnici comunali, agli abitanti, ai gestori del servizio idrico integrato, ecc.;
3. **indagine geofisica** (rilievo gravimetrico o microgravimetrico, geoelettrico, elettromagnetico, radar, sismico di superficie o in foro o altro) condotta utilizzando uno o più metodi di prospezione, opportunamente scelti in base alla situazione locale (area da investigare, profondità da raggiungere, stratigrafia ipotizzata, presenza o meno di materiali fini in superficie che possono limitare la penetrazione in profondità, possibili interferenze quali presenza di sottoservizi, ecc.). La scelta del metodo di indagine ritenuto più adeguato andrà argomentata e motivata dai professionisti incaricati. Indicazioni operative sui diversi metodi sono illustrate nella Tabella 1;
4. **indagine geognostica diretta** comprendente prove penetrometriche e uno o più sondaggi a carotaggio continuo, in numero e distribuzione dipendenti dall'estensione dell'area da investigare, utili per la verifica delle stratigrafie preesistenti, per la taratura dei rilievi geofisici di superficie e/o per la realizzazione di rilievi geofisici in foro (es. tomografie sismiche tra fori adiacenti) e la loro calibrazione. La profondità d'indagine deve essere definita in modo tale che sia utile alla taratura dei dati relativi ai rilievi geofisici, nonché alla verifica delle stratigrafie esistenti. Le indagini devono in ogni caso raggiungere le profondità alle quali è più probabile che si attestino cavità o orizzonti a bassa o nulla resistenza, se questa informazione è indicata negli studi a carattere sovralocale (comunale o di area vasta). Indicazioni operative sui diversi metodi sono illustrate nella Tabella 1;
5. **delimitazione, caratterizzazione e classificazione dei sinkhole** (naturali o antropogenici) secondo la classificazione ISPRA e utilizzando la scheda di cui all'Allegato B1 **o delle aree a potenziale presenza di sinkhole**;
6. **analisi della pericolosità/suscettività dell'area e delle aree limitrofe**;

7. relazione descrittiva degli approfondimenti svolti con cartografia e sezioni di sintesi delle informazioni raccolte con zonazione delle aree a diverso grado di pericolosità potenziale.

Tabella 1 - Principali metodologie di indagine, vantaggi e svantaggi

INDAGINE	VANTAGGI	SVANTAGGI
Prove penetrometriche dinamiche (PPD)	<ul style="list-style-type: none"> - Economiche, di facile realizzazione - Buona definizione della profondità sulla verticale in caso di intercettazione di cavità vuote - Per la loro economicità e per il fatto di acquisire dati di resistenza in continuo, costituiscono la prova principe ai fini della delineazione del quadro geotecnico di riferimento. La loro distribuzione minimale deve essere condotta seguendo la distribuzione geometrica consigliata dalla AGI 1977 e s.m.i. (maglia regolare anche per strutture di modesta entità) - La loro corretta distribuzione consente la migliore mappatura di base realizzabile attraverso prove dirette di tipo meccanico 	<ul style="list-style-type: none"> - Puntuali, quindi ad esempio l'intercettazione di occhi pollini è fortuita - La profondità raggiungibile dipende dal tipo di terreno - Prove indirette, quindi non consentono la visione diretta della stratigrafia di sottosuolo - Non è sempre fattibile riconoscere gli occhi pollini, quando questi si presentano come cavità riempite da depositi detensionati o cavità di piccole dimensioni
Prove penetrometriche statiche (PPS)	<ul style="list-style-type: none"> - Definizione delle litologie attraversate migliore che nelle PPD - Per la loro economicità e per il fatto di acquisire dati di resistenza in continuo, costituiscono la prova principe ai fini della delineazione del quadro geotecnico di riferimento. La loro distribuzione minimale deve essere condotta seguendo la distribuzione geometrica consigliata dalla AGI 1977 e s.m.i. (maglia regolare anche per strutture di modesta entità) - La loro corretta distribuzione consente la migliore mappatura di base realizzabile attraverso prove dirette di tipo meccanico 	<p>Stessi delle PPD, in più:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Adatte per terreni fini
Prove SPT in foro di sondaggio	<ul style="list-style-type: none"> - Prove standardizzate - Raggiungono profondità maggiori rispetto alle PPD o PPS - Se eseguite con punta aperta, consentono di prelevare un campione di terreno - Eventuali livelli a rifiuto possono essere superati con l'esecuzione del foro 	<ul style="list-style-type: none"> - Sono puntuali come le PPD e PPS - Non sono continue lungo la verticale e quindi è possibile non intercettare un occhio pollino; - Costi e tempi di realizzazione maggiori che per le PPD
Sondaggi	<ul style="list-style-type: none"> - Consentono la visione diretta dei terreni attraversati - Possono essere eventualmente accoppiati a prove SPT - La loro esecuzione, sempre consigliabile, deve essere considerata un compendio 	<ul style="list-style-type: none"> - Sono puntuali - Costi elevati - L'esecuzione del sondaggio può obliterare un occhio pollino, in special modo se si usa acqua quale fluido di circolazione

INDAGINE	VANTAGGI	SVANTAGGI
	alle indagini geotecniche in continuo di cui sopra (PPD e PPS)	- Possibile difficoltà nel recupero di materiale molto sciolto
Indagini Ground Penetrating Radar (GPR)	<ul style="list-style-type: none"> - Si prestano ad indagini su superfici ampie, solo se lisce e regolari, o comunque laddove può essere garantito un efficace accoppiamento tra antenna e terreno - In caso di cavità vuote di media dimensione, a bassa profondità (1-3 m p.c.) e su superfici ottimali, le anomalie radar ad esse associate hanno un'elevata probabilità di riconoscimento utilizzando antenne a media-bassa frequenza (400-500 MHz) 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessitano di una taratura - La propagazione degli impulsi EM è fortemente attenuata dai materiali ad alto-assorbimento, quali terreni ad elevata componente argillosa e terreni alterati - Poiché la riflessione degli impulsi è funzione del contrasto nelle proprietà EM dei materiali, nel caso di cavità riempite con materiale di caratteristiche simili a quello di contenimento (in particolare, per la presenza di frazione argillosa diffusa) la probabilità di riconoscimento è molto bassa - In contesti urbanizzati la presenza di sottoservizi e infrastrutture a bassa profondità diminuisce la riconoscibilità dei segnali a profondità elevata - Per la generale scarsa profondità di investigazione, soprattutto in terreni a matrice fine ad elevato assorbimento elettromagnetico, viene consigliata solo per la ricerca di strutture tipo "occhi pollini" vuote a piccola profondità (1-3 m circa di profondità da P.C.) - necessario compromesso tra costi e obiettivi di progettazione
Indagini geoelettriche multi-elettrodo 2D e 3D (Earth Resistivity Imaging; ERI)	<ul style="list-style-type: none"> - Indagine robusta, sia come acquisizione sia come elaborazione, laddove può essere garantito un efficace accoppiamento tra elettrodi ed terreno - Consente di indagare ampi volumi di terreno in profondità con una buona risoluzione (funzione del passo elettrodico), adottando strategie di acquisizione/elaborazione quasi-2D e 3D e in presenza di lunghezze adeguate per gli stendimenti - Consente di ottenere in ogni caso una visione/immagine di insieme del sottosuolo in forma continua e ripetibile 	<ul style="list-style-type: none"> - L'interpretazione dei valori di resistività, soprattutto quando non calibrata a livello locale, è affetta da incertezza in relazione alla complessità, all'eterogeneità e all'anisotropia dei terreni tipici del contesto di formazione degli occhi pollini e richiede necessariamente un approccio integrato geologico-geofisico e idro-geotecnico

INDAGINE	VANTAGGI	SVANTAGGI
	<p>nel tempo, altrimenti non ottenibile con altri metodi indiretti</p> <ul style="list-style-type: none"> - Costituiscono l'indagine geofisica più versatile e rappresentativa, in quanto sensibile a caratteristiche sia litologico-tessiturali che di saturazione; i risultati sono massimizzati quando realizzate a compendio e integrazione di adeguate indagini geotecniche 	<ul style="list-style-type: none"> - È uno strumento diagnostico potente, ma le anomalie ERI hanno caratteristiche che dipendono sia dalle caratteristiche della struttura sia da quelle del terreno che le circonda, per cui le anomalie non sono prevedibili a priori - Necessario compromesso tra costi e obiettivi di progettazione

Presentazione dei risultati relativi ad indagini sito-specifiche

Le analisi svolte sull'area, in sede attuativa, devono essere puntualmente descritte in una Relazione specifica, corredata da idonea cartografia, che deve includere:

- inquadramento dell'area di studio dal punto di vista geologico, geomorfologico, idrogeologico e strutturale, costruito in base ai dati esistenti nonché alla ricerca storica e bibliografica, corredato da idonea cartografia;
- l'esito dell'indagine locale, con rappresentazione dei punti oggetto di verifica/intervista, inclusi quelli che hanno dato esito negativo;
- descrizione dei rilievi geofisici, se svolti, con: a) esplicitazione del motivo che ha condotto alla scelta del metodo; b) rappresentazione della superficie oggetto di rilievo con tracciati/punti di indagine; c) ricostruzioni in sezione e areali del sottosuolo con evidenziazione delle anomalie;
- descrizione delle indagini geognostiche, se realizzate, con ubicazione (posizione indicata nel sistema di coordinate piane UTM32N riferito al sistema geodetico di riferimento WGS84, codice EPSG 32632), stratigrafia, fotografie carote;
- delimitazione e classificazione del/i fenomeno/i e compilazione della scheda riportata in Allegato B1, in caso i fenomeni abbiano generato evidenze superficiali;
- giudizio sintetico sulle limitazioni alle potenziali trasformazioni del suolo, comprendente l'indicazione delle opere di prevenzione e salvaguardia (accorgimenti costruttivi, smaltimento acque meteoriche, monitoraggi da adottare/prevedere) e loro rappresentazione cartografica.

Occorre tener presente che le indagini svolte in sede attuativa degli interventi edilizi secondo le indicazioni fornite dalle Norme Geologiche di Piano potrebbero evidenziare la necessità di subordinare la realizzabilità degli interventi edilizi ad interventi fondazionali e strutturali specifici o l'impossibilità di realizzare gli interventi previsti, anche a causa di un rapporto costi/benefici inaccettabile. È pertanto auspicabile che il Comune svolga la zonazione di dettaglio di cui alla Fase 2 in occasione della revisione della componente geologica, con approfondimento e secondo criteri omogenei a scala comunale e non rinvii questa fase alla fase attuativa.

Si fa presente, inoltre, che le analisi di approfondimento locale suggerite nella presente linea guida possono variare, sia a seconda del grado di pericolosità già definito o atteso, sia della tipologia delle nuove trasformazioni d'uso del suolo previste o dell'urbanizzazione già presente, tenendo conto che la finalità delle analisi è la prevenzione dei rischi in fase di pianificazione o la gestione dei rischi già presenti, sempre cercando un equilibrio tra costi e benefici attesi.

Monitoraggio

In base ai risultati delle indagini, alla tipologia e al processo di formazione del fenomeno rilevato, nonché alla tipologia di intervento di trasformazione del suolo prevista, potrà essere valutata la predisposizione di un piano di monitoraggio delle variazioni plano-altimetriche dell'area mediante il posizionamento razionale di capisaldi di misura, in numero adeguato rispetto all'estensione dell'area stessa e alle sue caratteristiche. A tale scopo potranno essere utilizzati anche i dati di interfometria radar consultabili anche attraverso il Geoportale della Lombardia.

Gestione delle acque meteoriche

Nelle aree interessate dai fenomeni in oggetto, va posta particolare attenzione alle modalità di gestione delle acque meteoriche che, soprattutto in caso di cavità presenti in depositi incoerenti, possono determinare lo sviluppo in estensione, e/o l'insorgenza di nuove discontinuità nei terreni.

È quindi da valutare attentamente in tali zone, nei progetti di invarianza idraulica, l'infiltrazione nel sottosuolo, secondo quanto riportato nel Regolamento Regionale 7/2017.