

Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA
Società Italiana di Geologia Ambientale - APS



Fondatore *Giuseppe Gisotti*

Supplemento al n. 3/2023 ISSN 1591-5352

ATTI DEL CONVEGNO

LA GEOLOGIA AMBIENTALE AL SERVIZIO DEL PAESE

ROMA, 10-11 OTTOBRE 2022



A CURA DI
Luciano Masciocco

**SESSIONE
RISCHI GEOLOGICI**





SPERI SOCIETÀ DI INGEGNERIA E DI ARCHITETTURA SPA

Una moderna società di ingegneria che porta a patrimonio fondamentale del proprio operato la conoscenza del contesto geologico e ambientale del territorio su cui interviene. Oltre 350 ruoli tecnici distribuiti su 8 sedi nazionali tra i quali oltre 25 tra geologi e ingegneri ambientali in costante crescita in numero e competenza. Partecipazione attiva nelle Associazioni Scientifiche e promozione della Ricerca e Sviluppo applicata all'ingegneria.



G.A.T. Dipartimento Geologia Ambiente e Territorio

 **SPERI**
TOGETHER. TOMORROW.

Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

Associazione di protezione ambientale a carattere nazionale riconosciuta dal Ministero dell'ambiente, della tutela del territorio e del mare con D.M. 24/5/2007 e con successivo D.M. 11/10/2017

Fondatore *Giuseppe Gisotti*

PRESIDENTE
Antonello Fiore

CONSIGLIO DIRETTIVO NAZIONALE

Lorenzo Cadrobbi, Daria Duranti, Antonello Fiore (*Presidente*), Adele Garzarella, Giuseppe Gisotti (*Presidente Onorario*), Marianna Morabito, Stefania Nisio, Fabio Oliva, Michele Orifici (*Vice Presidente*), Vincent Ottaviani (*Vice Presidente*), Paola Pino d'Astore (*Tesoriere*), Luciano Masciocco, Sabina Porfido, Livia Soliani, Salvatore Valletta (*Segretario*)

Geologia dell'Ambiente
Periodico trimestrale della SIGEA - APS

Supplemento al N. 3/2023
Anno XXXI • luglio-settembre 2023

Iscritto al Registro Nazionale della Stampa n. 06352
Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 229
del 31 maggio 1994

DIRETTORE RESPONSABILE
Antonello Fiore

CONDIRETTORE RESPONSABILE
Eugenio Di Loreto

COMITATO SCIENTIFICO
Mario Bentivenga, Aldino Bondesan, Francesco Cancellieri, Rachele Castro, Massimiliano Fazzini, Giuseppe Gisotti, Giancarlo Guado, Salvatore Lucente, Fabio Luino, Endro Martini, Luciano Masciocco, Davide Mastroianni, Antonio Paglionico, Mario Parise, Giacomo Prosser, Giuseppe Spilotro, Vito Uricchio, Gianluca Valensise

COMITATO DI REDAZIONE
Fatima Alagna, Federico Boccalaro, Valeria De Gennaro, Eugenio Di Loreto, Sara Frumento, Fabio Garbin, Michele Orifici, Vincent Ottaviani, Maurizio Scardella

REDAZIONE
SIGEA - APS c/o Fidaf - Via Livorno, 6 00198 Roma
info@sigeaweb.it

PROCEDURA PER L'ACCETTAZIONE DEGLI ARTICOLI

I lavori sottomessi alla rivista dell'Associazione, dopo che sia stata verificata la loro pertinenza con i temi di interesse della Rivista, saranno sottoposti a un giudizio di uno o più referees

UFFICIO GRAFICO
Pino Zarbo (Fraserighe Book Farm)
www.fraserighe.it

PUBBLICITÀ
SIGEA - APS

STAMPA
Industria grafica Sagraf Srl, Capurso (BA)

La quota di iscrizione alla SIGEA-APS per il 2023 è di € 30 e da diritto a ricevere la rivista "Geologia dell'Ambiente".
Per ulteriori informazioni consulta il sito web all'indirizzo www.sigeaweb.it

Sommario

Prefazione	
FABRIZIO CURCIO	5
Introduzione	
LUCIANO MASCIOCO	7
Maremoti nel Mediterraneo e in Italia: il ruolo del Centro Allerta Tsunami dell'INGV	
ALESSANDRO AMATO	11
Frane storiche di sbarramento nelle Dolomiti: da geoidicatori dell'evoluzione ambientale a rischio per la popolazione	
ALBERTO BERTINI	19
Difesa e riqualificazione di habitat costieri nel Parco Nazionale del Circeo – Un esempio di progettazione di ingegneria naturalistica	
FEDERICO BOCCALARO, FEDERICA MARSIALI	26
Proposte per la mitigazione del rischio geo-idrologico nella città di Ceva (CN)	
ANNALISA BOVE, LUCIANO MASCIOCO	43
La pianificazione del territorio e la mitigazione del rischio sismico attraverso gli studi di microzonazione sismica	
SERGIO CASTENETTO	48
L'area Napoletana: sulla mitigazione del rischio vulcanico più alto al Mondo	
GIUSEPPE DE NATALE, CLAUDIA TROISE, RENATO SOMMA, MASSIMO BUSCEMA, GUIDO MAURELLI, ANTONIO COVIELLO, STEFANO PETRAZZUOLI, ALFREDO TROCCIOLA, ADRIANO GIANNOLA	55
La scala ESI-07 (Environmental Seismic Intensity): uno strumento per la catalogazione e l'analisi degli effetti ambientali sismoindotti	
MARIA FRANCESCA FERRARIO, FRANZ A. LIVIO, ALESSANDRO MARIA MICHETTI, MARCO PIZZA, SABINA PORFIDO	64

In copertina: Alluvione in Romagna, maggio 2023

Rilevamenti geomorfologici di cavità sotterranee presenti nel territorio del Municipio Roma V per la previsione e prevenzione di fenomeni di sinkholes GIANLUCA FERRI, CARLO ALIMONTI, RICCARDO PAOLUCCI, GABRIELE SCANDALIATO, IVANO STRANIERI, CLAUDIO SUCCHIARELLI	70
Studio numerico parametrico dell'influenza di fattori ambientali, geo-strutturali e geomeccanici sulla stabilità di falesie costiere in rocce tenere PIERNICOLA LOLLINO, GIOACCHINO FRANCESCO ANDRIANI, GIUSEPPE DIPRIZIO, ISABELLA SERENA LISO, PAOLO MORELLI, MARIO PARISE	79
Mitigazione del rischio da dissesti in un'area a forte valenza turistica ed archeologica: Roca Vecchia e Grotte della Poesia (Melendugno, Puglia) GIUSEPPE MASTRONUZZI, PAOLO SANSÒ, GIOVANNI SCICCHITANO, ISABELLA SERENA LISO, SVEN BERTELMANN, ANDREA MARASSICH, MARIO PARISE	84
Gli effetti ambientali del terremoto di Casamicciola (Isola d'Ischia) del 21 agosto 2017: un contributo alla definizione del modello sismogenetico per la valutazione del rischio sismico ROSA NAPPI, SABINA PORFIDO, LUIGINA VEZZOLI, ELISA PAGANINI, MARIA FRANCESCA FERRARIO, GERMANA GAUDIOSI, GIULIANA ALESSIO, ALESSANDRO MARIA MICHETTI	90
I fenomeni di Sinkhole, stato delle conoscenze in Italia e problematiche aperte STEFANIA NISIO	95
Mappatura dei rischi idrogeologici e del rischio al cambiamento climatico per le infrastrutture SERENA PANTANESCHI, MARIA GIOVANNA CAMUTI, MARIO CALICCHIO, FEDERICO FORIA, GABRIELE MICELI	100
Affidabilità e miglioramento degli inventari franosi esistenti: caso di studio del Subappennino Dauno (Puglia, Italia Meridionale) ALESSANDRO PARISI, ILENIA ARGENTIERO, ROBERTA PELLICANI, GIUSEPPE SPILOTRO	103

Resilienza in Irpinia. Analisi e bilancio nell'Alta Valle del Calore dopo il terremoto del 1980 MARCO PIZZA, ALESSANDRO MARIA MICHETTI, MARIA FRANCESCA FERRARIO, ANGELO CAPONE, ROSA NAPPI, SABINA PORFIDO	110
Interventi di messa in sicurezza del sottosuolo in alcune aree di Villa De Sanctis interessate da fenomeni di sinkholes per presenza di cavità sotterranee (Roma Capitale - Municipio Roma V) GABRIELE SCANDALIATO, GIANLUCA FERRI, FRANCO ENZO SPAGNUOLO, CLAUDIO SUCCHIARELLI	115
Iconografia di una ricostruzione: l'esempio di Bisaccia (Avellino) dopo il terremoto del 23 novembre 1980 EFISIO SPIGA, SABINA PORFIDO	128
La nuova carta delle cavità sotterranee del territorio del Municipio Roma V (Roma Capitale) CLAUDIO SUCCHIARELLI, VITTORIO DI STEFANO, GIANLUCA FERRI, RICCARDO PAOLUCCI, IVANO STRANIERI, MARILISA RAUCCI	134
Pericolosità idrologica di Torino BATTISTA TABONI, ANNALISA BOVE, GESSICA UMILI, LUCIANO MASCIOCO	137
Proposte per rappresentare la suscettibilità del territorio al dissesto geo-idrologico BATTISTA TABONI, MAURO BONASERA, ANNALISA BOVE, GESSICA UMILI, LUCIANO MASCIOCO	143
Geological day Coste. Una giornata di escursione e di approfondimento geologico ambientale ALEANDRO TINELLI, EUGENIO DI LORETO, GIUSEPPE GISOTTI, GUIDO PALIAGA, FRANCESCO STRAGAPEDE, PIERO TINELLI	150

**“Investiamo con costanza
nello sviluppo di tecnologie
affidabili, innovative,
interoperabili e aperte
utili alla tutela del territorio
e alla salvaguardia
della popolazione.”**



*CAE S.p.A. propone un approccio multirischio
nella progettazione, realizzazione e manutenzione di
sistemi e tecnologie
per il monitoraggio e l'allertamento ambientale.*

CAE
innovation for a safer world.

Prefazione

Il territorio del nostro Paese è caratterizzato dalla importante e diffusa presenza di rischi geologici legati a sismi, vulcani, frane, cavità sotterranee, alluvioni e maremoti. L'esistenza e il grado di severità di tali rischi determinano, ai fini della tutela dei cittadini e dell'ambiente naturale ed antropizzato, la necessità di una loro mitigazione attraverso interventi strutturali, consistenti nella realizzazione di nuove opere o nella manutenzione di quelle esistenti, e interventi non strutturali, riguardanti la messa in atto di misure di protezione civile volte principalmente a preservare l'incolumità pubblica.

In un contesto di pericolosità geologiche così complesso come quello italiano, peraltro ulteriormente aggravato dall'incremento della frequenza e intensità dei fenomeni meteorologici, idrogeologici e idraulici causato dai cambiamenti climatici, diventa sempre più urgente provvedere al rafforzamento della previsione e prevenzione dei rischi. Tale potenziamento non può che partire dal miglioramento della conoscenza dei fenomeni e delle criticità presenti sul territorio.

In tal senso la pubblicazione degli Atti del Convegno *“La geologia ambientale al servizio del Paese”* costituisce un ottimo contributo vista l'ampia casistica di rischi geologici trattati e gli interessanti risultati esposti per i diversi casi di studio presi in esame.

Un'adeguata conoscenza del territorio, delle sue dinamiche e della sua evoluzione – attività conoscitive per le quali le competenze geologiche sono indispensabili – è la base sulla quale impostare una corretta pianificazione, programmazione e progettazione degli interventi di mitigazione sia di tipo strutturale sia di tipo non strutturale.

Questi ultimi, che, come detto, attengono principalmente alle competenze di protezione civile, riguardano azioni quali l'allertamento con il monitoraggio strumentale e il presidio territoriale, la pianificazione di protezione civile con la definizione degli scenari di evento e di rischio e del modello di intervento, l'informazione alla popolazione, la diffusione della conoscenza e la formazione degli operatori.

Tra gli interventi non strutturali rientrano gli studi di microzonazione sismica che rivestono una notevole importanza nella pianificazione territoriale, al fine di stabilire gerarchie di pericolosità utili per la programmazione degli interventi di riduzione del rischio sismico alle varie scale, nonché di orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti, definire gli interventi ammissibili in una determinata area, programmare le indagini e i livelli di approfondimento e, infine, stabilire modalità e priorità di intervento nelle aree urbanizzate.

Con la Legge 77/2009 (*“Legge Abruzzo”*), relativa alla ricostruzione delle aree colpite dal disastroso terremoto che ha colpito l'Abruzzo e principalmente il suo capoluogo L'Aquila nel 2009, venne stanziato quasi un miliardo di euro per la realizzazione di un programma di interventi di prevenzione del rischio sismico sul territorio italiano, che mirava principalmente a ridurre la perdita di vite umane e a migliorare la gestione delle emergenze nelle aree a più elevata pericolosità.

Attraverso tale programma, che ha superato il decimo anno di attività, sono stati finanziati alle Regioni e alle Province autonome oltre 4000 studi di microzonazione sismica conformi agli indirizzi e standard nazionali, con il supporto di una Commissione tecnica alla quale partecipano anche gli Ordini professionali (geologi, ingegneri, architetti, geometri) e i rappresentanti delle associazioni territoriali (ANCI, UPI, UNCEM). I risultati degli studi, peraltro ancora in essere, hanno consentito alle Regioni e alle Province autonome di legiferare per il recepimento della microzonazione sismica nella pianificazione territoriale.

Grazie all'azione sinergica delle strutture nazionali, regionali e locali di protezione civile le misure non strutturali nel nostro Paese si sono, quindi, nel corso degli anni notevolmente sviluppate.

Relativamente all'allertamento per i fenomeni cosiddetti “prevedibili”, il nostro Paese si è dotato dal 2004 di un sistema nazionale e regionale per il rischio idrogeologico e idraulico, basato sui Centri Funzionali per la previsione e il monitoraggio dei fenomeni, che si avvale di una rete di monitoraggio meteo-idro-pluviometrica e di una rete radar meteo nazionale.

Dal 2017 è stato, inoltre, istituito un sistema nazionale di allerta per i maremoti indotti da sisma (SiAM). Anche per le aree vulcaniche esiste un sistema di

allertamento basato sui livelli di allerta che vengono dichiarati dal Dipartimento della protezione civile, in accordo con la Regione interessata, sulla base delle valutazioni della comunità scientifica. Per fenomeni estremamente rapidi sono inoltre operativi in via sperimentale sistemi di allertamento specifici, quali quelli per Stromboli ed Etna.

Con riferimento alla pianificazione di protezione civile ai diversi livelli territoriali, precise indicazioni metodologiche per la gestione delle attività connesse ad eventi calamitosi di diversa natura e gravità sono contenute nella Direttiva del Presidente del Consiglio del 30 aprile 2021 (*"Indirizzi di predisposizione dei piani di Protezione Civile"*).

In tale direttiva (cd Direttiva Piani) viene evidenziata, tra l'altro, l'importanza della individuazione e gestione delle criticità, tra cui quelle di natura geologica, presenti nel territorio italiano attraverso adeguati scenari di evento e di rischio ai quali fare riferimento per impostare una efficace pianificazione di protezione civile.

In linea con le indicazioni dettate dalla Direttiva Piani, sono state realizzate le attività previste dal Programma per il supporto al rafforzamento della governance in materia di riduzione del rischio ai fini di protezione civile, finanziato nell'ambito del *PON Governance e capacità istituzionale 2014-2020* e condotto dal Dipartimento della protezione civile in raccordo con l'Agenzia per la Coesione Territoriale.

Il Programma, che ha riguardato le regioni Basilicata, Calabria, Campania, Puglia e Sicilia, ha portato alla predisposizione di linee guida, procedure e *tool* informatici per la mitigazione, secondo livelli standard, dei rischi idrogeologico, idraulico, sismico e vulcanico. I prodotti realizzati sono stati recepiti dalle amministrazioni regionali coinvolte diventando così strumenti d'uso comune nella protezione civile di livello regionale e/o comunale.

L'informazione e la diffusione della cultura dei rischi rivestono indubbiamente un ruolo fondamentale per incrementare la consapevolezza della popolazione e per favorire l'adozione di misure di autoprotezione e di azioni di tutela della collettività e del singolo.

Il sistema di protezione civile, a partire dal 2011 organizza e svolge la campagna nazionale "Io non rischio", iniziativa di comunicazione nazionale sulle buone pratiche di protezione civile. La campagna informativa ha riguardato fino ad oggi fenomeni calamitosi quali i terremoti, le alluvioni, gli incendi boschivi, i maremoti, le manifestazioni vulcaniche. A tale iniziativa si affiancano molte altre azioni svolte a livello territoriale e locale, che possono fornire le informazioni sui rischi che interessano gli specifici contesti territoriali e le relative pianificazioni di protezione civile.

A questo lavoro si affianca quello, quotidiano, svolto sugli organi di stampa e sulle piattaforme dei social network sia da parte del Dipartimento che delle componenti e strutture operative del sistema, un impegno utile a raggiungere le più diverse fasce della popolazione con l'obiettivo citato della diffusione della consapevolezza dei rischi e della conoscenza del territorio in cui viviamo.

È inoltre in fase avanzata di sperimentazione un nuovo sistema di allarme pubblico per l'informazione diretta alla popolazione (IT-alert), che dirama ai telefoni cellulari presenti in una determinata area geografica messaggi utili in caso di gravi emergenze o catastrofi imminenti o in corso.

In conclusione, il potenziamento di misure non strutturali di mitigazione del rischio ha assunto un carattere di estrema urgenza in ragione dei rilevanti impatti sul territorio causati dai fenomeni estremi. All'esecuzione di tali misure hanno dato nel corso degli anni un importante contributo i geologi, pubblici dipendenti e liberi professionisti, le cui competenze anche per il futuro saranno essenziali per accompagnare l'intero sistema di protezione civile nella corretta definizione delle criticità da affrontare e degli interventi da attuare.

Fabrizio Curcio

Capo Dipartimento Protezione Civile

Introduzione

La prima Sessione degli Atti del Convegno *La Geologia Ambientale al servizio del Paese*, tenutosi a Roma nei giorni 10-11 ottobre 2022 in occasione del trentennale della Società Italiana di Geologia Ambientale – APS, raccoglie 21 articoli dedicati ai *rischi geologici*.

Il rischio geologico (R) è il prodotto della pericolosità geologica (H) per i due parametri di un eventuale bene esposto: la vulnerabilità del bene (V) e il suo valore (E).

$$R = H \cdot (V \cdot E)$$

Il nostro territorio è soggetto a pericoli geologici (H) di origine endogena (terremoti, tsunami, eruzioni vulcaniche) e di origine esogena (alluvioni, frane, *sinkhole*).

Basterebbe evitare di esporsi in zone pericolose dal punto di vista geologico per azzerare i fattori del bene (V · E) ed eliminare di conseguenza il rischio geologico.

Nel nostro Paese, solo il rischio sismico non è eliminabile in questo modo. Infatti il pericolo sismico si concentra ai margini delle placche litosferiche e, purtroppo, l'Italia è un margine tra due placche convergenti: la placca euroasiatica e la placca africana. Per tale ragione, non ci resta che convivere con frequenti terremoti, cercando di evitare le zone ove sappiamo che gli effetti del terremoto possono amplificarsi (cfr. articoli di Castenetto; Ferrario *et al.*; Nappi *et al.*; Pizza *et al.*; Spiga & Porfido), cercando di mitigare il rischio con l'adozione di tecniche antisismiche nelle costruzioni e nelle ristrutturazioni degli edifici ed evitando di costruire a pochi metri dal mare (situazione riscontrabile frequentemente sui nostri litorali) per non esporci ad eventuali maremoti (cfr. articolo di Amato).

Invece il rischio vulcanico potrebbe essere annullato: basterebbe non abitare nei pressi dei 10 vulcani attivi segnalati dall'INGV: Colli Albani, Campi Flegrei, Ischia, Vesuvio, Stromboli, Panarea, Lipari, Vulcano, Etna, Pantelleria. Purtroppo sono tutte zone abitate e la città metropolitana di Napoli, con la più alta densità abitativa d'Italia, è la zona a più alto rischio vulcanico al mondo (cfr. articolo di De Natale *et al.*).

Anche il rischio geo-idrologico sarebbe facilmente annullabile. Una corretta pianificazione territoriale dovrebbe impedire di costruire sia in zone suscettibili alle frane (cfr. articoli di Bertini; Lollino *et al.*; Pantaneschi *et al.*; Parisi *et al.*; Taboni, Bonasera *et al.*) o all'erosione (cfr. articoli di Boccalaro & Marsiali; Tinelli *et al.*) o ai *sinkhole* (cfr. articoli di Ferri *et al.*; Nisio; Mastronuzzi *et al.*; Succhiarelli *et al.*; Scandaliato *et al.*) sia in corrispondenza degli impluvi ove si concentrano naturalmente tutti i flussi (inondazioni, alluvioni, colate di terra, colate di detrito, valanghe e, tornando al rischio vulcanico, anche colate laviche, nubi ardenti, lahar...).

Sono invece innumerevoli i casi di costruzioni accanto e addirittura sopra i corsi d'acqua (cfr. articoli di Bove & Masciocco; Taboni *et al.*): tristemente famosi sono i casi di Genova, delle Cinque Terre, della Costiera Amalfitana. Purtroppo, in occasione di ogni evento alluvionale, i mass media ci informano sulle condizioni delle abitazioni inondate da acqua e fango ma quasi mai ci informano sulla inidonea ubicazione di tali costruzioni. Inoltre la legge prevede ancora oggi che, in queste zone pericolose, a seguito della realizzazione di opere di difesa, saranno possibili nuove edificazioni, ampliamenti o completamenti: in tal modo, il rischio viene ulteriormente aumentato a causa dell'incremento del valore esposto, rendendo inutile l'effetto mitigatore degli interventi realizzati.

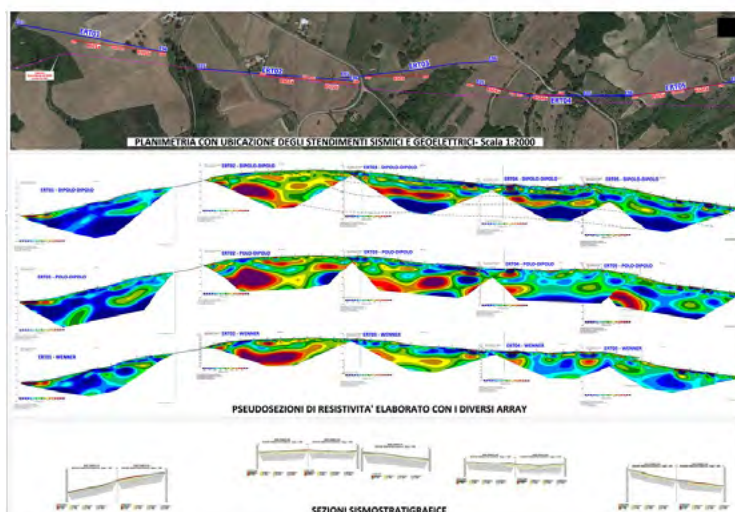
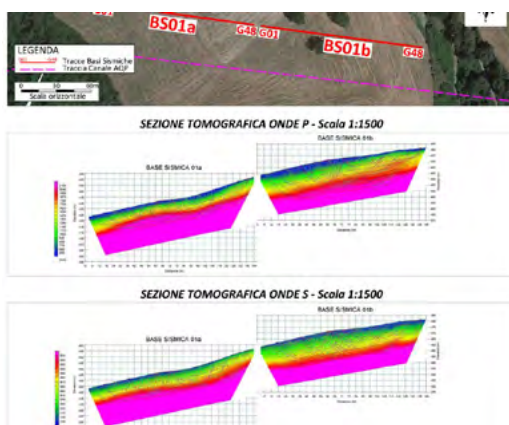
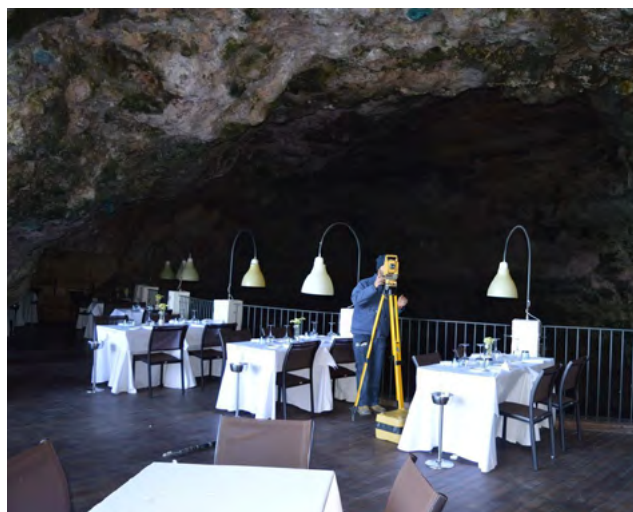
Restiamo pertanto in fiduciosa attesa dell'introduzione prima o poi di una certificazione obbligatoria sulla pericolosità geologica nell'atto di compravendita degli edifici.

Luciano Masciocco



- GEOLOGIA
- GEOFISICA
- TOPOGRAFIA
- TEMPORARY
MANAGEMENT

WWW.APOGEO.BIZ



The background features a stylized, light gray illustration of a mountain range. A circular emblem, resembling a stylized sun or a crest, is positioned at the top center, partially overlapping the mountain peaks. The text is centered over this background.

SESSIONE RISCHI GEOLOGICI

SI GEEA

Sottocontrollo.



Strumenti ad alta tecnologia anche a noleggio per:

Studio del sottosuolo

Georadar, sismica, geoelettrica, inclinometri ...

Monitoraggio sismico

Sismometri, strong motion, reti early warning ...

Monitoraggio ambientale

Magnetometri, sonde oceanografiche ...



*Rilievo sinkhole e doline
con laser scanner da foro.*

*Seleziona
il link!*

Tecnologie



Codevintec rappresenta anche:



CODEVINTEC

Tecnologie per le Scienze della Terra e del Mare

tel. +39 02 4830.2175 | info@codevintec.it | www.codevintec.it

Maremoti nel Mediterraneo e in Italia: il ruolo del Centro Allerta Tsunami dell'INGV

Tsunamis in the Mediterranean and in Italy: the role of the INGV Tsunami Alert Center

Parole chiave: Maremoto, Tsunami, Monitoraggio, Allertamento, Mediterraneo, Pericolosità

Key words: Tsunami, Monitoring, Alert, Mediterranean, Hazard

INTRODUZIONE

Nell'articolo sul volume "Rischio sismico in Italia: analisi e prospettive per una prevenzione efficace in un Paese fragile", edito dalla SIGEA nel 2018, avevamo pubblicato un contributo dal titolo "Il Centro Allerta Tsunami (CAT) dell'INGV", in cui venivano descritti i presupposti per i quali era stato creato il CAT e la sua evoluzione a partire dal 2012 e fino all'inizio della sua operatività, nel 2017. Come descritto in quel contributo, l'attività del CAT si svolgeva, e tuttora si svolge, nell'ambito del Sistema nazionale di Allertamento per i Maremoti di origine sismica (SiAM) e in quello internazionale coordinato dall'UNESCO tramite la Commissione Oceanografica Intergovernativa (IOC) (Amato e Team CAT, 2018). In quel momento, il SiAM era stato istituito da poco (DirPCM, 2017) mentre il CAT era stato accreditato dall'UNESCO/IOC nel 2016. Come si ricorderà, il SiAM comprende il Dipartimento della Protezione Civile nazionale (DPC), il CAT dell'INGV e l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA).

Le attività operative del CAT in ambito nazionale erano state avviate il 1° gennaio 2017, nell'ambito della convenzione tra INGV e DPC, dopo alcuni anni di attività sperimentale (Michelini *et al.*, 2016; Amato, 2020). Nell'articolo SIGEA del 2018 era stato quindi delineato lo schema operativo del SiAM e del CAT, erano state descritte le attività del sistema di allerta tsunami nel contesto nazionale e internazionale, le attività di monitoraggio e allerta degli anni 2015-2017, con un focus sul terremoto e maremoto di Kos-Bodrum del 2017, e infine venivano presentate alcune considerazioni sulla prevedibilità dell'evento e le risposte della scienza.

In questo contributo, dopo una breve descrizione delle attuali procedure di allertamento, illustrerò alcuni casi recenti

nel Mediterraneo, per poi descrivere i principali avanzamenti scientifici e tecnologici degli ultimi anni. In particolare, verranno descritte le attivazioni del CAT nel periodo 2017-2022 (con un breve commento sull'allerta tsunami provocata dal terremoto in Turchia del 6 febbraio 2023). Tra gli sviluppi recenti, accennerò brevemente al nuovo metodo di *forecast* probabilistico (Selva *et al.*, 2021a), attualmente in fase di sperimentazione al CAT, l'attività di sorveglianza per i maremoti a Stromboli, in collaborazione con l'Università di Firenze e oggetto di una nuova convenzione con il DPC, e in generale agli sforzi della comunità scientifica per estendere l'allerta alle altre sorgenti potenziali di tsunami, oltre a quelle di origine sismica (Selva *et al.*, 2021b).

DIRAMAZIONE DEI MESSAGGI DI ALLERTA: MODALITÀ E CRITICITÀ

A oggi il CAT dell'INGV, in qualità di Tsunami Service Provider dell'ICG/NEAMTWS (*Intergovernmental Coordination Group del Tsunami Warning and mitigation System in the North-East Atlantic, Mediterranean and connected seas*) invia la messaggistica di allertamento tsunami a numerosi Paesi che si affacciano sul Mediterraneo o sull'Atlantico orientale (da ovest a est): Portogallo, Spagna, Francia, Malta, Grecia, Turchia, Cipro, Libano, Egitto, Israele, oltre che a Germania, Regno Unito e molti Enti europei. Anche la Francia, la Grecia, la Turchia e più recentemente il Portogallo svolgono le funzioni di *Tsunami Service Provider* del NEAMTWS, ciascuno per una specifica regione di interesse tra l'Atlantico e il Mediterraneo. Soltanto il CAT ha come area di competenza l'intero bacino del Mediterraneo, ma non invia i messaggi di allerta per l'Atlantico nord-orientale, come fanno invece la Francia e il Portogallo. Per un'analisi dell'organizzazione e delle modalità

operative del Gruppo di Coordinamento Intergovernativo del NEAM, nonché delle problematiche connesse al monitoraggio e all'allertamento per tsunami di origine sismica si veda Amato (2020), UNESCO-IOC (2020 e 2023), Lorito *et al.* (2021a).

Al momento nel NEAMTWS, come per tutti gli altri ICG coordinati dall'IOC dell'UNESCO, l'allertamento avviene soltanto per gli tsunami provocati da terremoti, che costituiscono la stragrande maggioranza del totale dei maremoti conosciuti e che sono quelli con gli effetti più importanti ed estesi, oltre a essere gli unici a poter essere in qualche modo "prevedibili". Pertanto la sorveglianza tsunami si basa sul monitoraggio rapido dei forti terremoti. I criteri per l'allertamento sono stabiliti da una matrice decisionale, basata sulla magnitudo dei terremoti, la distanza dalla costa e la profondità ipocentrale, che è stata proposta nei primi anni di pre-operatività del NEAMTWS (Tinti *et al.*, 2012) e successivamente adottata con alcune modifiche dal CAT nel 2016 (Amato *et al.*, 2021).

Il monitoraggio di routine del CAT, svolto da personale in turno H24 nella Sala sismica dell'INGV a Roma, riguarda tutto il globo. La decisione di effettuare il monitoraggio dei terremoti a scala globale è stata presa all'inizio dell'attività del CAT, con lo scopo di mantenere il servizio sempre operativo, permettendo così di testare quotidianamente i software e le procedure e di tenere alta l'attenzione del personale in turno e in reperibilità.

Per gli eventi al di fuori dell'area mediterranea, i messaggi di allerta vengono inviati soltanto a una mailing list interna, a scopo di verifica. Per gli eventi all'interno del Mediterraneo, oltre all'invio ai Paesi elencati sopra, la messaggistica viene naturalmente inviata anche al Dipartimento della Protezione Civile nazionale, che la inoltra automa-

ticamente agli Enti locali e a tutte le strutture operative partecipanti al servizio di Protezione Civile (Amato *et al.*, 2021). Ciascuno di questi Enti risponde all'allerta attivando le proprie procedure di emergenza.

Sul territorio, le azioni di protezione della popolazione dovrebbero essere disciplinate nei piani di Protezione Civile comunali. Per la redazione di questi piani il Dipartimento nazionale ha emesso nel 2018 delle linee guida specifiche (DPC, 2018) a integrazione della Direttiva SiAM del 2017. Quest'ultima prevedeva che i Comuni aggiornassero i piani di protezione civile per il rischio maremoto entro dodici mesi dalla sua emanazione. In realtà, per vari motivi, non ultimi gli anni di pandemia, sono pochi i Comuni che al momento (inizio 2023) hanno aggiornato i piani per il rischio maremoto. Elemento essenziale di questi piani è la definizione sul territorio delle aree di evacuazione in caso di allerta ARANCIONE o ROSSA (ADVISORY o WATCH). Nel primo caso ci si aspetta un run-up (quota topografica raggiunta dal mare durante l'inondazione) massimo di 1 metro, mentre in caso di allerta rossa il runup atteso è superiore a 1 metro. Al momento questi valori, unitamente a quelli della pericolosità da tsunami a lungo termine (Basili *et al.*, 2021) sono stati utilizzati per definire le aree di inondazione, disponibili sul sito dell'ISPRA (<http://sgi2.isprambiente.it/tsunamimap/>). Da notare che in caso di allerta arancione la zona da evacuare corrisponde a quella che ricade entro la quota topografica di 2 metri, per tenere conto dell'incertezza che esiste sul modello digitale del terreno. Per l'allerta rossa, le aree di inondazione sono state definite, in accordo con le scelte del Dipartimento della Protezione Civile nazionale, come descritto nei documenti a corredo della Direttiva SiAM (DirPCM, 2017) e le successive Indicazioni per l'aggiornamento dei piani di protezione civile locali (DPC, 2018). Ai Comuni è demandato inoltre il compito di allertare i cittadini. Su questo tema, legato alla copertura del c.d. "ultimo miglio", si sta discutendo da tempo in ambito internazionale e nazionale, allo scopo di identificare le migliori pratiche da attuare per garantire la riduzione del rischio nelle comunità costiere.

Tra queste, va citato il programma di riconoscimento "Tsunami Ready" dell'UNESCO, avviato di recente nell'area del NEAMTWS e nello specifico in Italia (Amato *et al.*, 2023) dopo alcuni

anni di esperienze positive in altri ICG come negli oceani Pacifico e Indiano.

TERREMOTI E ALLERTAMENTO TSUNAMI NEL MEDITERRANEO TRA IL 2017 E IL 2022

Nell'articolo del 2018, già citato, avevamo descritto brevemente gli tsunami del catalogo euro-mediterraneo (EMTC, Maramai *et al.*, 2014; 2019; Papadopoulos *et al.*, 2017), evidenziando quali fossero le regioni più soggette alla generazione di terremoti potenzialmente tsunamigenici: da ovest a est, le coste nordafricane del Marocco e dell'Algeria, l'Italia meridionale, il Mar Ligure e l'Adriatico e poi soprattutto lo Ionio, l'Egeo, il Mar di Marmara e gli archi di Creta e di Cipro, fino alle propaggini più orientali del Mediterraneo (si veda la Fig. 1 in Amato *et al.*, 2018). Qui descriveremo le attivazioni del CAT nel periodo 2017-2022 che, come si vedrà, pur coprendo un intervallo temporale molto breve (6 anni contro i molti secoli dell'EMTC) ben ricalcano il trend a lungo termine.

Dal 1° gennaio 2017, data di inizio della fase operativa del CAT nell'ambito del SiAM, al 31 dicembre 2022, sono state 35 le attivazioni delle procedure di allertamento, comprendendo con questo termine anche l'invio dei messaggi di Informazione, emessi per terremoti di magnitudo superiore a 5.5 ma inferiore a 6.0. Se si considerano i primi mesi del 2023, le attivazioni totali arrivano a 40, tra i quali c'è il terremoto della Turchia del 6 febbraio 2023.

In particolare, cinque eventi (di magnitudo compresa tra 6.7 e 7.9) hanno determinato l'attivazione del CAT con messaggi di allerta rossa (WATCH). A parte l'evento turco del 6 febbraio 2023 (M7.9), per gli altri quattro casi si è trattato di allerta rossa locale, ossia entro 100 km dall'epicentro. Come si vede dalla tabella 1, si tratta in tutti i quattro casi di eventi in Grecia o in Turchia. In uno di questi casi (terremoto M6.8 a Zante) l'allerta ha interessato anche l'Italia (con livello arancione / ADVISORY), trovandosi alcune delle nostre regioni del sud entro la distanza di soglia di 400km dall'epicentro. Del terremoto del 2023 in Turchia parleremo nel seguito.

Sette dei 40 eventi della lista hanno avuto livello di allerta arancione (ADVISORY), mentre i restanti 28 hanno determinato un livello di INFORMAZIONE, quindi non una vera allerta.

Come si vede dalla Tabella 1 e dalla Figura 1, anche le coste italiane sono state interessate da eventi sismici importanti ($M \geq 5.5$), tali da provocare l'attivazione delle procedure del CAT, anche se non sopra la soglia dell'allertamento vero e proprio. Si tratta del terremoto avvenuto il 27/3/2021 nel Mar Adriatico Centrale, con magnitudo 5.6; del terremoto di magnitudo 5.5 avvenuto il 31/10/2022 nel Golfo di Policastro (Mar Tirreno meridionale), a profondità di 260 km; dell'evento sismico di magnitudo 6.0 del 9/11/2022 al largo della costa marchigiana (Pesaro-Urbino); di tre terremoti avvenuti al largo di Malta il 24/1/2023, il 30/1/2023 e il 21/4/2023.

I tempi di invio del messaggio iniziale a partire dal tempo origine del terremoto sono stati tra 6 e 10 minuti nella quasi totalità dei casi; per un solo evento si è superato il tempo massimo previsto dalla Direttiva SiAM 2017 (che prevede un massimo di 14 minuti) in quanto l'evento del 27 marzo 2021 era stato stimato sotto soglia ma in un successivo ricalcolo della sala sismica INGV la magnitudo Richter era stata stimata in 5.6. È stato deciso quindi di inviare ugualmente il messaggio INFORMAZIONE, sia pure tardivamente, anche in considerazione del fatto che non devono essere intraprese azioni di protezione civile con questo genere di messaggi.

Al contrario, in caso di messaggi di ADVISORY (allerta arancione) o WATCH (allerta rossa), tutte le strutture operative facenti parte del sistema nazionale di protezione civile (definiti nel D.Lgs. 1/2018 all'art. 13, reperibili qui: <https://servizio-nazionale.protezionecivile.gov.it/it/strutture-operative/>) mettono in atto i rispettivi piani di intervento, come descritto nella sezione precedente.

Tra gli eventi più significativi di questo periodo (Tab. 1), descriverò qui brevemente quello di Zante del 25 ottobre 2018 e quello di Samos-Izmir del 30 ottobre 2020. Una menzione speciale merita l'evento in Turchia del 6 febbraio 2023, che ha causato numerose problematiche anche per l'allerta tsunami che ha provocato. Altri eventi che hanno generato un'allerta e in qualche caso un piccolo tsunami sono avvenuti nel 2017 a Kos (Amato e Team CAT, 2018), al largo di Creta nel 2020 (Papadopoulos *et al.*, 2020; Baglione *et al.*, 2021) e al largo delle coste algerine nel 2021 (Tab. 1). Nei mari intorno all'Italia, l'evento più significativo è stato in Adriatico, al largo delle Marche settentrionali, il 9 novembre 2022, magnitudo 6.0.

Tabella 1. Lista degli eventi avvenuti nel Mediterraneo tra gennaio 2017 e febbraio 2023 che hanno determinato l'attivazione del Centro Allerta Tsunami dell'INGV. La magnitudo dei terremoti avvenuti in questo periodo nell'area è compresa tra 5.5 e 7.9

Origin Time UTC	Region	Mag	Depth Km	Alert level	Initial message issued at:
21/04/23 22:19	Malta	5.5	9	Information	21/04/23 22:29
20/02/23 17:04	Turkey	6.3	20	Advisory	20/02/23 17:12
06/02/23 01:17	Turkey	7.9	20	Basin Watch	06/02/23 01:25
30/01/23 19:55	Malta	5.6	9	Information	30/01/23 20:04
25/01/23 12:37	Greece	5.7	35	Information	25/01/23 12:44
24/01/23 20:25	Malta	5.6	16	Information	24/01/23 20:34
23/11/22 01:08	Turkey	6.1	10	Information	23/11/22 01:14
09/11/22 06:07	Italy	6.0	12	Information	09/11/22 06:13
31/10/22 21:41	Italy	5.5	260	Information	31/10/22 21:51
02/10/22 04:04	Greece	5.6	20	Information	02/10/22 04:10
08/09/22 07:36	Greece	5.6	94	Information	08/09/22 07:44
31/08/22 10:10	Greece	5.5	10	Information	31/08/22 10:18
20/05/22 12:35	Marocco	5.5	11	Information	20/05/22 12:44
22/04/22 21:07	Bosnia and Herzegovina	5.9	10	Information	22/05/22 21:13
02/02/22 21:03	Cyprus	5.5	35	Information	02/02/22 21:14
11/01/22 01:07	Cyprus	6.4	20	Advisory	12/10/21 01:17
29/12/21 05:08	Greece	5.5	18	Information	29/12/21 05:15
26/12/21 18:59	Greece	5.5	10	Information	26/12/21 19:06
19/10/21 05:32	Greece	6.0	106	Information	19/10/21 05:40
12/10/21 09:24	Greece	6.1	20	Advisory	12/10/21 09:31
27/09/21 06:17	Greece	6.2	20	Advisory	27/09/21 06:24
27/03/21 13:47	Italy/Albania	5.6	5	Information	27/03/21 14:23
18/03/21 01:04	Algeria	6.2	13	Advisory	18/03/21 01:14
04/03/21 18:38	Greece	5.9	11	Information	04/03/21 18:47
03/03/21 11:16	Greece	6.3	20	Information	03/03/21 11:24
30/10/20 11:51	Greece	7	10	Watch	30/10/20 11:59
18/09/20 16:28	Greece	5.9	20	Information	18/09/20 16:35
20/05/20 23:43	Greece	5.5	10	Information	20/05/20 23:55
02/05/20 12:51	Greece	6.7	10	Watch	02/05/20 12:59
21/03/20 00:49	Greece	5.8	12	Information	21/03/20 00:57
30/01/20 11:21	Greece	5.9	11	Information	30/01/20 11:30
27/11/19 07:23	Greece	5.8	15	Information	27/11/19 07:30
26/11/19 02:54	Albania	6.5	20	Advisory	26/11/19 03:01
26/09/19 10:59	Turkey	5.9	10	Information	26/09/19 11:08
21/09/19 14:04	Albania	5.9	10	Information	21/09/19 14:13
20/03/19 06:34	Turkey	6.0	10	Information	20/03/19 06:41
30/10/18 15:12	Greece	5.9	10	Information	30/10/18 15:20
25/10/18 22:54	Greece	6.8	19	Watch	25/10/18 23:02
20/07/17 22:31	Turkey	6.8	10	Watch	20/07/17 22:41
12/06/17 12:28	Greece	6.5	16	Advisory	12/06/17 12:38

In questo caso il messaggio è stato di INFORMAZIONE, non richiedendo quindi interventi operativi di protezione civile, ed è stato inviato 6 minuti dopo l'evento (Tab. 1).

TERREMOTO A ZANTE DEL 25 OTTOBRE 2018

Il terremoto è avvenuto nella notte tra il 25 e il 26 ottobre 2018, alle 22:54 UTC del 25 (le 00:54 del 26 in Italia).

L'epicentro era localizzato al largo della costa dell'isola di Zante, una delle isole della Grecia ionica, a una profondità di 10-12 km, la magnitudo stimata tra 6.7 e 6.8. Subito dopo il terremoto, il

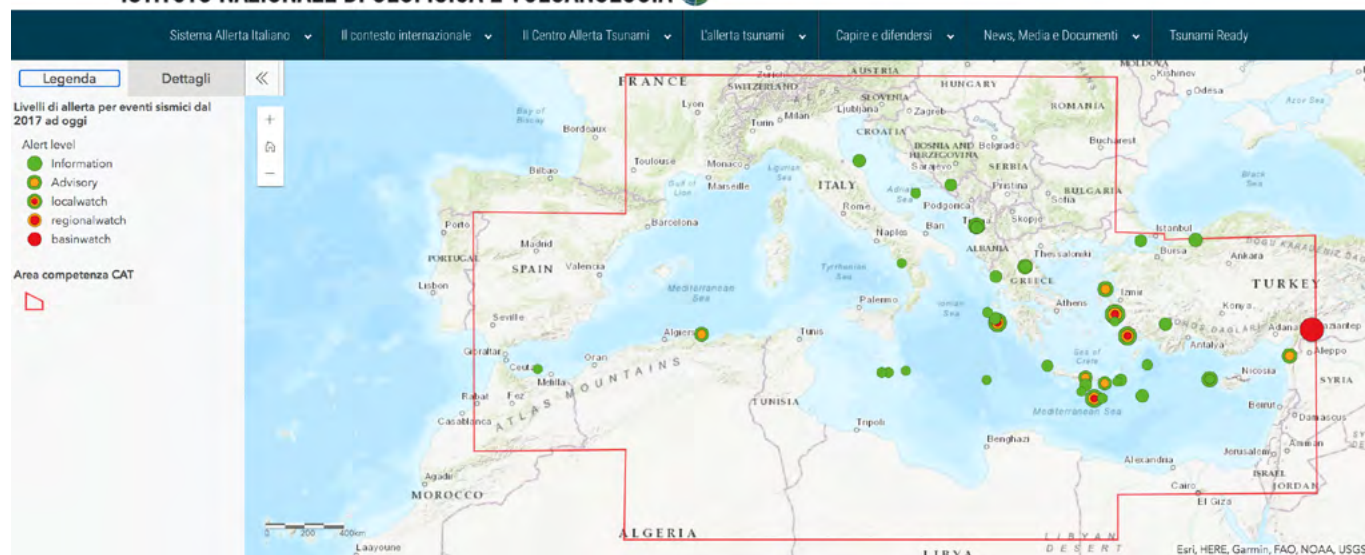


Figura 1. Epicentri dei terremoti che hanno attivato le procedure del CAT dal 2017 a marzo 2023 (dal sito del Centro Allerta Tsunami dell'INGV: <https://cat.ingv.it/it/>)

CAT-INGV ha emesso un messaggio di allerta rossa per la Grecia (entro 100 km dall'epicentro), arancione per altre aree della Grecia ionica, per l'Albania e per l'Italia. Il messaggio è stato inviato 8 minuti dopo il tempo origine del terremoto (Tab. 1).

Il tipo di terremoto ha fortunatamente evitato la generazione di uno tsunami significativo, trattandosi di un meccanismo di tipo transpressivo, con una componente up-dip limitata. I modelli di sorgente calcolati per questo evento nelle analisi effettuate nei mesi successivi non chiariscono definitivamente se esso sia avvenuto sulla zona di subduzione dell'arco ellenico o su una faglia trascorrente (Ganas *et al.*, 2020; Cirella *et al.*, 2020; Papadimitriou *et al.*, 2021; Sokos *et al.*, 2020).

Ancora più incerte sono le informazioni sul tipo di faglia nei primi minuti dopo il terremoto ma poiché il messaggio deve essere diramato nel minor tempo possibile, esso viene emesso basan-

dosi soltanto sulla posizione ipocentrale (in mare o vicino alla costa) e sulla magnitudo (in base alla matrice decisionale descritta in Amato *et al.*, 2018)), quando ancora non sono disponibili i dati relativi al meccanismo focale del terremoto. Nel caso del terremoto di Zante del 2018, il CAT aveva diramato l'allerta (rossa per la Grecia, arancione per Albania e Italia) 8 minuti dopo il terremoto, un tempo sufficiente per intraprendere eventuali azioni di protezione civile nel nostro Paese. Infatti, come si vede dalla Figura 2, il tempo di arrivo della prima eventuale onda di tsunami per le coste del sud Italia più prossime all'epicentro (la Calabria ionica) sarebbe stato di circa 30 minuti, di circa 40 per la Puglia salentina, di 50 per la Sicilia orientale. Va detto che al momento dell'evento di Zante, nel 2018, quasi nessun comune italiano aveva aggiornato il piano di protezione civile per il rischio maremoto e quindi l'allerta passò quasi inosservata. Fortunatamente, come accennato sopra,

uno tsunami significativo non si è generato, anche se modeste anomalie del livello del mare associabili al maremoto sono state osservate in alcuni mareografi in Grecia e in Italia, come a Crotone e Otranto.

Le reazioni all'allerta notturna del 25-26 ottobre 2018 hanno rivelato una scarsa conoscenza del fenomeno e una sottovalutazione del rischio. Ad esempio in Puglia, una delle regioni italiane con livello di allerta ADVISORY (arancione), il sindaco di una città del Salento dichiarò che egli aveva ricevuto il messaggio di allerta dal Dipartimento di Protezione Civile ma che, trattandosi di onde di maremoto inferiori a 1 metro (in realtà nel messaggio si parla di *runup* atteso, ossia della quota topografica a cui potrebbe arrivare l'inondazione) aveva reputato il fenomeno non pericoloso e non aveva intrapreso alcuna azione di allertamento (intervistato il giorno successivo, dichiarò che "...qui a Otranto siamo abituati, con una semplice



Figura 2. Epicentro del terremoto di Zante del 25 ottobre 2018 (stella rossa). I triangoli rossi sono i punti di previsione (Forecast Points, FP) per i quali è stato calcolato un livello di allerta rossa (WATCH), quelli gialli sono quelli con livello arancione (ADVISORY), mentre i triangoli verdi rappresentano i FP in cui non si prevede l'arrivo di uno tsunami significativo (INFORMATION). Le isolinee rappresentano le isocrone di propagazione dello tsunami (i numeri indicano i valori ogni 10 minuti)



Figura 3. Epicentro del terremoto di Samos del 30 ottobre 2020 (stella rossa). Per i simboli e le isolinee si veda la figura 2

tramontana, a onde di tre metri e siamo in alto rispetto alla quota del mare. Quello di stanotte non l'ho quindi ritenuto un problema", fonte: <https://www.trnews.it/2018/10/26/rientrata-lallerta-tsunami-ma-saremmo-preparati/232957>).

La considerazione è certamente scorretta, in quanto è noto che inondazioni di tsunami anche alte meno di un metro possono essere pericolose per le persone a causa della loro energia, essendo più simili a un torrente in piena che a un'onda di vento, anche alta, e capaci di inondare aree piuttosto vaste, specialmente in corrispondenza delle foci di fiumi o di canali costieri. Inoltre, le onde di tsunami possono trasportare a elevata velocità frammenti di materiali vari strappati lungo il percorso, diventando così ancora più pericolose per chi si trovasse sul loro percorso.

Che la consapevolezza del rischio tsunami fosse limitata in Italia era stato evidenziato da uno studio realizzato nel 2018 dal nostro Centro Allerta Tsunami proprio confrontando la conoscenza e la percezione del rischio dei cittadini di Calabria e Puglia (Cerase *et al.*, 2019; si veda anche Cugliari *et al.*, 2022). In particolare la Puglia, a causa di un tempo trascorso dagli ultimi eventi piuttosto elevato (ci si riferisce agli tsunami del XVII e XVIII secolo, si veda Maramai *et al.*, 2014 e 2019), mostrava un livello di percezione del rischio molto basso, confrontato con la Calabria. In questa regione, infatti, la memoria ancora presente del terremoto e del maremoto del 1908, così come probabilmente quella dello tsunami di Stromboli del 2002 e forse anche la presenza di vulcani attivi nel Tirreno meridionale, hanno contribuito a rendere più evidente nei cittadini locali la presenza di questo rischio (Cugliari *et al.*, 2022; si vedano anche

Gravina *et al.*, 2019; Cerase e Cugliari, 2023).

TERREMOTO (E TSUNAMI) A SAMOS DEL 30 OTTOBRE 2020

Nell'articolo sul volume SIGEA citato all'inizio (Amato e Team CAT, 2018) veniva descritto l'evento del 2017 che aveva interessato Kos in Grecia e Bodrum in Turchia la sera del 20 luglio. L'evento, di magnitudo stimata tra 6.6 e 6.8, aveva generato uno tsunami con *runup* osservati di poco superiori ai 2 metri che aveva provocato danni in alcune località greche e turche, fortunatamente senza provocare vittime (Dogan *et al.*, 2021; Triantafyllou *et al.*, 2021; Kalligeris *et al.*, 2022).

Nel 2020, un terremoto di magnitudo poco superiore (7.0) si è verificato al largo dell'isola di Samos la notte del 30 ottobre, non distante da Kos. Anche in questo caso il messaggio di allerta è stato inviato dal CAT 8 minuti dopo il terremoto (Tab. 1). La mappa in Fig. 3 mostra l'area che è stata contraddistinta nel messaggio iniziale come "WATCH" (allerta massima, ossia *runup* attesi maggiori di 1 metro, in rosso nella figura), che comprende i "Forecast Point" (FP) entro 100 km dall'epicentro. I FP a distanze comprese tra i 100 e i 400 km ricadono invece nell'area "ADVISORY" (*runup* atteso minore di 1 metro, in giallo-arancio nella figura). Come si vede dalla Fig. 3 il livello rosso e il livello arancione hanno interessato le coste greche e turche mentre in questo caso le coste italiane, come quelle di tutti gli altri Paesi mediterranei, non sono state allertate (simboli verdi in figura). In questi casi viene comunque inviato un messaggio di "INFORMATION" a tutti i Paesi interessati per avvertire

dell'avvenuto evento sismico e del fatto che non ci si aspetta un maremoto.

L'evento del 30 ottobre 2020 ha effettivamente prodotto uno tsunami locale, moderato ma dannoso. Dogan *et al.* (2021), Triantafyllou *et al.* (2021) e Kalligeris *et al.* (2022) riportano *runup* intorno ai 3.8 metri in alcune località della Turchia. In questa circostanza i danni indotti dallo tsunami sono stati maggiori dell'evento di Kos del 2017 e purtroppo una persona in Turchia è stata uccisa dall'inondazione che si è propagata molto rapidamente sulle coste. In particolare, alcuni video registrati dalle telecamere posizionate lungo la costa mostrano che i primi effetti dello tsunami (in questo caso un ritiro del mare) sono stati osservati soltanto 2-3 minuti dopo il terremoto. Anche in questo caso, come già accaduto per lo tsunami del 2017 a Kos, si nota inoltre che la seconda ingressione è stata quella più importante. A Samos la seconda inondazione avviene però molto rapidamente, dopo un secondo ritiro del mare, ma solo 4-5 minuti dopo il terremoto (Fig. 4). A Kos le due ingressioni erano avvenute rispettivamente 13 e 21 minuti dopo il terremoto, a causa della maggiore distanza dalla costa e probabilmente dalle caratteristiche del terremoto e del fondale marino.

Nel caso di Samos, le immagini di una webcam posizionata in uno stabilimento balneare a Karlovassi, mostrano molto bene la velocità con cui avviene il fenomeno (Fig. 4). I quattro scatti in figura si riferiscono a quattro momenti tra poco più di 2 e poco più di 4 minuti dopo il tempo origine del terremoto: la sequenza mostra il primo ritiro del mare (a), la prima inondazione, contenuta (b), e due momenti della seconda inondazione (c, d), iniziata soltanto un minuto



Figura 4. Quattro momenti dello tsunami osservato a Karlovassi, sull'isola di Samos, il 30 ottobre 2020. Il terremoto è avvenuto alle 11:51:26 (ora UTC). I quattro scatti, ripresi da una telecamera di sorveglianza, si riferiscono rispettivamente a 2'25" (in alto a sinistra), 3'07" (in basso a sinistra), 4'14" (in alto a destra) e 4'16" (in basso a destra) dopo il terremoto. Il video commentato può essere visto sul canale YouTube INGVterremoti: <https://www.youtube.com/watch?v=YM6bba4n5W4>. A maggio 2023 il video è stato visualizzato 2.8 milioni di volte

dopo la prima. Nel video si nota anche come le persone, pur avendo avvertito sicuramente il forte terremoto (un sisma di magnitudo 7 a pochi chilometri di distanza si avverte molto forte e con una durata molto sostenuta), non mostrino una particolare urgenza nell'evacuazione. Si noti che tra l'allontanamento della signora del pannello a) e la seconda onda passano meno di due minuti. Quest'ultima onda, come si vede dalla figura, possiede una grande energia, riuscendo a trascinare vigorosamente un grosso frigorifero e altri oggetti, spalancando le porte dell'edificio, spostando fuori molti oggetti che si trovavano all'interno.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il sistema di allertamento tsunami nel Mediterraneo ha fatto grandi progressi negli ultimi dieci anni. Sotto il coordinamento della Commissione Oceanografica Intergovernativa dell'UNESCO, il NEAMTWS è ora pienamente operativo per gli tsunami di origine sismica, con cinque Tsunami Service Provider che coprono diversi settori della regione NEAM, comprendente l'oceano Atlantico nordorientale, il Mediterraneo e i mari connessi (Mare di Marmara, Mar Nero ecc.). Il Centro Allerta Tsunami dell'INGV è diventato pienamente operativo nel 2017, dopo alcuni anni di sperimentazione (Amato

et al., 2021). Dal 2017 all'inizio del 2023 si sono avute 40 attivazioni del CAT, per eventi sismici in mare o vicini alle coste di magnitudo pari o superiore a 5.5 (Fig. 1 e Tab. 1). Nello stesso periodo, è stato determinato il primo modello di pericolosità per gli tsunami di origine sismica nell'area NEAM, tramite il progetto europeo TSUMAPS-NEAM (Basili *et al.*, 2021).

L'esperienza di questi anni ha mostrato i pregi e i limiti dei metodi attualmente in uso. Alcune importanti indicazioni sul futuro della ricerca nel campo della pericolosità e del rischio tsunami sono state tracciate di recente da Behrens *et al.* (2021) e da Lorito *et al.* (2021b).

Al livello di procedure di allertamento, i limiti della Matrice Decisionale, già noti e discussi in altri contesti, sono emersi chiaramente con il terremoto del 6 febbraio 2023 in Turchia. La procedura attualmente in uso prevede infatti che per eventi sismici di magnitudo pari o superiore a 7.5 in mare o entro 100 km dalla costa venga emesso un messaggio di allerta rossa (WATCH) per l'intero bacino del Mediterraneo. La notte del 6 febbraio, infatti, il CAT ha diramato un messaggio di allerta rossa per tutti i Paesi del Mediterraneo, inclusa naturalmente l'Italia. Il messaggio iniziale di allerta è stato emesso dal CAT 8 minuti dopo il terremoto, quando ancora

le informazioni sull'evento sismico non permettevano di capire che tipo di caratteristiche potesse avere (meccanismo focale, direzione della rottura, ecc.). Come da prassi, subito dopo il primo messaggio è iniziata l'osservazione del livello del mare erano avvenute rispettivamente 13 e 21 minuti naturalmente dai mareografi più prossimi all'epicentro, per confermare l'eventuale tsunami o revocare l'allerta. Nel caso specifico, i due mareografi più vicini all'epicentro mostravano delle anomalie del livello del mare sicuramente legate allo tsunami, sia pure di ampiezza limitata a pochi decimetri, motivo per cui l'allerta è stata confermata. In un caso del genere, i tempi di arrivo stimato per la prima onda di tsunami variano da pochissimi minuti (per le coste orientali della Turchia) a molte ore per i paesi del Mediterraneo centrale e occidentale. Per l'Italia, i primi mareografi che avrebbero dovuto rilevare lo tsunami erano quelli di Calabria, Puglia e Sicilia orientale, dove l'inondazione sarebbe potuta arrivare tra le 4 e le 5 ore dopo l'evento. Come noto, lo tsunami non è arrivato a interessare le coste italiane, ma in quelle ore (tra le 2:17, tempo origine del terremoto, e le 6:30 del mattino in Italia, tempo di arrivo previsto a Crotone della prima onda di tsunami) non era possibile escluderne la presenza, anche a causa dello scarsissimo numero di mareografi

presenti nel Mediterraneo orientale, oltre che dell'assenza di boe d'alto mare per la misurazione degli tsunami.

In Italia, il sistema di Protezione Civile è stato attivato con il messaggio iniziale del CAT alle 2:25 della notte. Da quel momento, tutte le strutture facenti parte del sistema sono state allertate. Le risposte degli Enti locali (Regioni, Prefetture, Comuni) a quest'allerta, la prima di questo livello a coinvolgere tutto il sistema nazionale, hanno evidenziato una generale non preparazione a un evento di questo tipo.

Il perdurare di un'allerta rossa per diverse ore, per di più notturne, ha determinato risposte eterogenee, anche a causa del fatto che pochissimi Enti avevano i piani di protezione civile per il rischio maremoto definiti e sperimentati. Non entrerà in questo contributo nei dettagli di tali comportamenti, ma vorrei evidenziare un lato positivo di questo evento: a valle dell'allerta mancata, cancellata poi alle 7:02, quindi 4 ore e 45 minuti dopo l'evento sismico, numerosi realtà locali hanno rimesso il rischio tsunami tra le priorità dei loro piani di protezione civile, attivando così procedure che erano rimaste ferme negli ultimi anni.

Dal punto di vista scientifico, l'evento turco ha determinato un'accelerazione nel processo di superamento della Matrice Decisionale, a favore del cosiddetto Probabilistic Tsunami Forecast (PTF). Il metodo, sviluppato dal CAT negli ultimi anni e pubblicato da Selva *et al.* (2021a), al momento del terremoto turco era in fase di test e di validazione da parte di un gruppo di esperti internazionali chiamati in causa dal Consiglio Scientifico dell'INGV. Questo metodo permetterà di risolvere la maggior parte dei problemi legati alla Matrice, fornendo stime più accurate basate su una grande quantità di scenari precalcolati e su un approccio probabilistico. Una prerogativa importante di questo approccio è la separazione tra le stime effettuate dal metodo scientifico, corredate dalla relativa incertezza, e le soglie che dovranno essere scelte dai decisori per definire il livello di "rischio accettabile", o meglio di cautela da adottare (a priori) e applicare poi in caso di allerta. Nei prossimi mesi questo processo porterà auspicabilmente all'implementazione operativa del PTF per l'allertamento tsunami nel Mediterraneo.

Altre sfide importanti dei prossimi anni riguardano la definizione della pericolosità da tsunami di origine non sismica e le procedure di allertamento che ne

conseguiranno. L'esperienza internazionale, dopo i recenti tsunami distruttivi del vulcano Anak Krakatoa e dell'Hunga Tonga, sta spingendo i centri di allerta mondiali, tutti nati e organizzati per la difesa dagli tsunami di origine sismica, a occuparsi anche delle altre potenziali sorgenti di maremoti (frane, vulcani, ecc., si veda Selva *et al.*, 2021b).

In particolare, dal 2022 il CAT è stato coinvolto dal DPC nella gestione del sistema di allerta tsunami di Stromboli, progettato, realizzato e gestito dal Laboratorio di Geofisica Sperimentale dell'Università di Firenze (https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/Portals/0/Knowledge/DRMKC_Featured_Events/critechWorkshop2022/presentations/P6-StromboliEWS-RIPEPE.pdf). Nei prossimi anni, il sistema attuale dovrà essere irrobustito, mentre anche l'aspetto modellistico (Esposti Ongaro *et al.*, 2021) sarà ulteriormente sviluppato per ottenere una stima probabilistica della pericolosità da tsunami a Stromboli.

Altri sviluppi in corso al CAT riguardano la valutazione della pericolosità a scala locale, necessaria per le aree ad elevata urbanizzazione, per impianti industriali e in generale per aree costiere a elevata esposizione e vulnerabilità (Volpe *et al.*, 2019; Tonini *et al.*, 2021).

Come accennato sopra, nel Mediterraneo non esistono al momento attuale boe d'alto mare con sensori di pressione per la misura degli tsunami (le c.d. DART). Queste consentirebbero di ridurre le incertezze nella stima degli tsunami in tempo reale (Angove *et al.*, 2020). Nel 2022, nell'ambito del PNRR, sono state finanziate le risorse per l'acquisto di due boe tipo DART, che il CAT cercherà di installare nel Mar Ionio.

Altri sviluppi in corso riguardano lo studio della percezione del rischio tsunami, avviato nel 2018 e proseguito negli ultimi anni (Cerase *et al.*, 2019; Cugliari *et al.*, 2022), che verrà proseguito per migliorare la strategia di comunicazione del CAT e contribuire a ridurre il rischio per la popolazione, prestando anche attenzione agli aspetti delle responsabilità di chi gestisce i sistemi di allerta (Valbonesi *et al.*, 2019).

BIBLIOGRAFIA

AMATO A. E TEAM CAT (2018), *Il Centro Allerta Tsunami (CAT) dell'INGV*. In: Autori vari. (a cura di): Antonello Fiore e Vincent Ottaviani, *Rischio sismico in Italia: analisi e prospettive per una prevenzione efficace in un Paese fragile*. Vol. 1/2018,

Società Italiana di Geologia Ambientale (SIGEA).

AMATO A (2020), *Some reflections on tsunami Early Warning systems and their impact, with a look at the NEAMTWS*. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 61. doi: 10.4430/bgta0329

AMATO A, AVALLONE A, BASILI R, BERNARDI F, BRIZUELA B *et al.* (2021), *From seismic monitoring to tsunami warning in the Mediterranean sea*. Seismological Research Letters 92 (3): 1796–1816. doi: 10.1785/0220200437

AMATO A, CUGLIARI L, GRAZIANI L, ROMANO F, VALBONESI C (2023), *Tsunami Ready in Italy: towards the UNESCO recognition* (abstract). EGU23-15864, EGU General Assembly 2023, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-15864>.

ANGOVE M, ARCAS D, BAILEY R, CARRASCO P, COETZEE D *et al.* (2019), *Ocean observations required to minimize uncertainty in global tsunami forecasts, warnings, and emergency response*. Frontiers in Marine Science, doi:10.3389/fmars.2019.00350.

BAGLIONE E, LORITO S, PIATANESI A, ROMANO F, BASILI R, BRIZUELA B, TONINI R, VOLPE M, BAYRAKTAR H.B., AND AMATO A (2021), *Characterisation of fault plane and coseismic slip for the May 2, 2020, Mw 6.6 Cretan Passage earthquake from tide gauge tsunami data and moment tensor solutions*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 21, 3713–3730, 2021 <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3713-2021>

BASIL R, BRIZUELA B, HERRERO A, IQBAL S, LORITO S *et al.* (2021), *The making of the NEAM tsunami hazard model 2018 (NEAMTHM18)*, Frontiers in Earth Science. doi: 10.3389/feart.2020.616594.

BEHRENS J, LØVHOLT F, JALAYER F, LORITO S, SALGADO-G LVEZ MA *et al.* (2021), *Probabilistic tsunami Hazard and risk analysis: A review of research gaps*. Frontiers in Earth Science 9: 628772. doi: 10.3389/feart.2021.628772.

CERASE A, CRESCIMBENE M, LA LONGA F, AMATO A (2019), *Tsunami risk perception in southern Italy: First evidence from a sample survey*. Natural Hazards and Earth System Sciences 19: 2887–2904. doi: 10.5194/nhess-19-2887-2019.

CERASE A, CUGLIARI L. (2023), *Something Still Remains: Factors Affecting Tsunami Risk Perception on the Coasts Hit by the Reggio Calabria-Messina 1908 Event (Italy)*. Sustainability, 15(3):2787. <https://doi.org/10.3390/su15032787>.

CIRELLA A, ROMANO F, AVALLONE A, PIATANESI A, BRIOLE P, GANAS A, THEODOULIDIS N, CHOUSIANITIS K, VOLPE M, BOZIOSELLOS G, SELVAGGI G, LORITO S (2020), *The 2018 Mw 6.8 Zakynthos (Ionian Sea, Greece) earthquake: seismic source and local tsunami characterization*. Geophys. J. Int., 221, 1043–1054, doi:10.1093/gji/ggaa053.

CUGLIARI L, CRESCIMBENE M, LA LONGA F, CERASE A, AMATO A, CERBARA L (2022), *Tsunami risk perception in Central and Southern Italy*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22, 4119–4138, 2022 <https://doi.org/10.5194/nhess-22-4119-2022>

- DIRPCM (2017), *Direttiva Del Presidente Del Consiglio Dei Ministri: Istituzione del Sistema d'Allertamento nazionale per i Maremoti generati da sisma* - SiAM. Gazzetta Ufficiale Serie Generale, 128, 05-06-2017.
- DOGAN GG, YALCINER AC, YUKSEL Y, ULUTAŞ E, POLAT O *et al.* (2021), *The 30 October 2020 Aegean sea tsunami: post-event field survey along Turkish coast*. Pure and Applied Geophysics, 178: 785–812. doi: 10.1007/s00024-021-02693-3.
- DPC (2018), Dipartimento della Protezione Civile - Presidenza del Consiglio dei Ministri. *Indicazioni alle Componenti ed alle Strutture operative del Servizio nazionale di protezione civile per l'aggiornamento delle pianificazioni di protezione civile per il rischio maremoto*. Gazzetta Ufficiale 266: 15-11-2018. <https://www.protezionecivile.gov.it/it/normativa/indicazioni-alle-componenti-ed-alle-strutture-operative-del-servizio-nazionale-di-protezione-civile-per-l-aggiornamento-delle-pianificazioni-di-protezione-civile>
- EPOSTI ONGARO T, DE' MICIELI VITTURI M, CERMINARA M, *et al.* (2021), *Modeling Tsunamis Generated by Submarine Landslides at Stromboli Volcano (Aeolian Islands, Italy): A Numerical Benchmark Study*. Frontiers in Earth Science, 9, DOI=10.3389/feart.2021.628652.
- GANAS A, BRIOLE P, BOZIOELOS G, BARBEROPOULOU A, ELIAS P, TSIRONI V, VALKANIOTIS S, MOSHOU A, MINTOURAKIS I (2020), *Journal of Geodynamics*, 137, June 2020, 101731, <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101731>.
- GRAVINA T, MARI N, FARINA L, CALABRIA P (2019), *Tsunami risk perception along the Tyrrhenian coasts of Southern Italy: the case of Marsili volcano*, Nat. Hazards, 97, 437–454, <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03652-x>, 2019.
- KALLIGERIS N, SKANAVIS V, CHARALAMPAKIS M, *et al.* (2022), *Field survey of the 30 October 2020 Samos (Aegean Sea) tsunami in the Greek islands*. Bull Earthquake Eng 20, 7873–7905 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01250-6>.
- LORITO S, AMATO A, CUGLIARI L., ROMANO F, TONINI R, VALBONESI C, VOLPE M (2021a), *Tsunami hazard, warning, and risk reduction in Italy and the Mediterranean Sea: state of the art, gaps, and future solutions*. Turkish J Earth Sci (2021) 30: 882–897 doi:10.3906/yer-2110-7.
- LORITO S, BEHRENS J, LØVHOLT F, ROSSETTO T, SELVA J (2021b), *Editorial: From Tsunami Science to Hazard and Risk Assessment: Methods and Models*. Frontiers in Earth Science. doi: 10.3389/feart.2021.764922.
- MARAMAI A, GRAZIANI L, BRIZUELA B (2019), *Euro-Mediterranean Tsunami Catalogue (EMTC)*, version 2.0. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/tsunami/emtc.2.0>
- MARAMAI A, BRIZUELA B, GRAZIANI L (2014), *The Euro-Mediterranean tsunami catalogue*. Annals of Geophysics 57: 0435. doi: 10.4401/ag-6437.
- MARAMAI A, GRAZIANI L, BRIZUELA B (2021), *Italian tsunami effects database (ITED): the first database of tsunami effects observed along the Italian coasts*. Frontiers in Earth Science 9: 596044. doi: 10.3389/feart.2021.596044.
- MICHELINI A, MARGHERITI L, CATTANEO M, *et al.* (2016), *The Italian National Seismic Network and the earthquake and tsunami monitoring and surveillance systems*. Adv. Geosci., 43, 31–38, 2016, doi:10.5194/adgeo-43-31-2016
- PAPADIMITRIOU P, KAPETANIDIS V, KARAKONSTANTIS A, SPINGOS I, PAVLOU K, KAVIRIS G, KASSARAS I, SAKKAS V, VOULGARIS N (2021), *The 25 October 2018 Zakynthos (Greece) earthquake: seismic activity at the transition between a transform fault and a subduction zone*. Geophys. J. Int., Volume 225, Issue 1, April 2021, Pages 15–36, <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa575>.
- PAPADOPOULOS GA, GRÀCIA E, URGELES R, SALLARES V, DE MARTINI PM *et al.* (2017), *Historical and pre-historical tsunamis in the Mediterranean and its connected seas: Geological signatures, generation mechanisms and coastal impacts*. Marine Geology 354: 81–109. doi: 10.1016/j.margeo.2014.04.0140025-3227.
- PAPADOPOULOS GA, LEKKAS E, KATSETSIADOU KN, ROVYTHAKIS E, YAHAV A (2020), *Tsunami alert efficiency in the Eastern Mediterranean sea: the 2 May 2020 earthquake (Mw6.6) and near-field tsunami south of Crete (Greece)*. GeoHazards 1: 44–60. doi: 10.3390/geohazards1010005.
- SELVA J, LORITO S, VOLPE M, ROMANO F, TONINI R *et al.* (2021a), *Probabilistic tsunami forecasting for early warning*. Nature Communications 12: 5677. doi: 10.1038/s41467-021-25815-w.
- SELVA J, AMATO A, ARMIGLIATO A, BASILI R, BERNARDI F *et al.* (2021b), *Tsunami risk management for crustal earthquakes and non-seismic sources in Italy*. La Rivista del Nuovo Cimento 44: 69–144. doi: 0.1007/s40766-021-00016-9.
- SOKOS E, GALLOVIĆ F, EVANGELIDIS CP, SERPETSIDAKI A, PLICKA V, KOSTELECKÝ J, ZAHRADNÍK J (2020), *The 2018 Mw 6.8 Zakynthos, Greece, Earthquake: Dominant Strike-Slip Faulting near Subducting Slab*, Seismol. Res. Lett. 91, 721–732, doi: 10.1785/0220190169.
- TINTI S, GRAZIANI L, BRIZUELA B, MARAMAI A, GALLAZZI S (2012), *Applicability of the decision matrix of north eastern Atlantic, mediterranean and connected seas tsunami warning system to the Italian tsunamis*. Natural Hazards and Earth System Sciences 12: 843–857. doi: 10.5194/nhess-12-843-2012.
- TONINI R, DI MANNA P, LORITO S, SELVA J, VOLPE M *et al.* (2021), *Testing tsunami inundation maps for evacuation planning in Italy*. Frontiers in Earth Science 9: 628061. doi: 10.3389/feart.2021.628061.
- TRIANTAFYLLOU I, GOGOU M, MAVROULIS S, LEKKAS E, PAPADOPOULOS GA *et al.* (2021), *The tsunami caused by the 30 October 2020 Samos (Aegean Sea) Mw7.0 earthquake: hydrodynamic features, source properties and impact assessment from post-event field survey and video records*. Journal of Marine Science and Engineering 9: 68. doi: 10.3390/jmse9010068.
- UNESCO-IOC (2020), *Tsunami Early Warning and Mitigation System in the North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and Connected Seas (NEAMTWS) 2005–2020*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373791>
- UNESCO-IOC (2023), *The North-Eastern Atlantic, the Mediterranean and connected seas Tsunami Early Warning and Mitigation System (ICG/NEAMTWS) 2030 Strategy (summary)*. Paris, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. 2023. (IOC Brochure 2023-2). <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000385120>
- VALBONESI C, AMATO A, CERASE A (2019), *The INGV Tsunami Alert Centre: analysis of the responsibility profiles, procedures and risk communication issues*, Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata Vol. 60, n. 2, pp. 359–374; June 2019 DOI 10.4430/bgta0252
- VOLPE M, LORITO S, SELVA J, TONINI R, ROMANO F *et al.* (2019), *From regional to local SPTHA: efficient computation of probabilistic tsunami inundation maps addressing near-field sources*. Natural Hazards and Earth System Sciences 19: 455–469. doi: 10.5194/nhess-19-455-2019.

RINGRAZIAMENTI

L'autore ringrazia tutte le colleghe e i colleghi del Centro Allerta Tsunami dell'INGV per la collaborazione e le discussioni di questi anni.

Frane storiche di sbarramento nelle Dolomiti: da geoindicatori dell'evoluzione ambientale a rischio per la popolazione

Historical landslide dams in the Dolomites: from geoindicators of environmental evolution at risk for the population

Parole chiave: frane di sbarramento, Dolomiti, geoindicatori
Key words: landslide dams, Dolomites, geoindicators

Alberto Bertini
Insegnante di scienze presso Polo
Scolastico Follador di Agordo (BL)
E-mail: claraia@libero.it

INTRODUZIONE

Tra i numerosi tipi di frane che interessano un territorio montuoso, quelle conosciute con il termine inglese *Landslide Dams* rappresentano una serie di eventi abbastanza frequenti nelle zone di montagna: quando una frana scende lungo un versante fluviale ostruendo l'alveo del corso d'acqua, si può avere uno sbarramento con formazione di uno o più laghi a monte del corpo franoso (**Upstream Lake**). Il blocco delle acque può essere parziale o totale e la durata del bacino può essere variabile da caso a caso, da poche ore a più giorni nel qual caso lo specchio lacustre sarà considerato effimero o temporaneo oppure può avere origine un lago permanente come nel caso del Lago di Alleghe. Questo comporta dei rischi se la zona dove è avvenuta la formazione di un nuovo specchio lacustre è abitata: infatti la rottura improvvisa dell'invaso dovuta alla pressione delle acque tratteneute può portare a pericolosi episodi di inondazione per i territori a valle dello sbarramento noti in letteratura geologica con il termine inglese di **Downstream Outburst** (Es. frane 12, 14, 18, 19, 20, 25, 30). Non va poi dimenticato il fatto che la frana che causa lo sbarramento può provocare danni diretti alle infrastrutture come case, strade, ponti, ecc. (Es. frane 1, 2, 6, 7, 8, 9, 11, 13, 16, 18, 20, 23, 26 e 32). Inoltre la creazione di un nuovo lago può portare ad aumentare il rischio di tsunami lacustri (Es. frana 13). Dal punto di vista ambientale la formazione rapida di un lago porta a dei cambiamenti anche notevoli nel paesaggio come ad esempio la perdita di terreno coltivabile o per pascolo e la interruzione delle vie di comunicazione: inoltre la distruzione delle strutture e la perdita di vite umane possono arrecare

danni notevoli sia dal punto di vista economico che sociale. Non va trascurato il fatto che lo sbarramento di un corso d'acqua, sia naturale che artificiale, modifica il livello di base della valle fluviale con conseguente aumento del rischio di inondazioni in aree precedentemente più sicure. È per questo motivo che le *landslide dams* possono essere considerate **Geoindicatori**, intendendo con questo termine una serie di indicatori di natura geologica utilizzati per valutare i rapidi cambiamenti ambientali di una determinata zona (Berger 1997).

Le frane di sbarramento sono numerose in tutto il territorio montano italiano: sono stati costruiti database con eventi di varie località italiane (Alpi, Appennino). In questo articolo vengono descritti casi di blocco fluviale con relativa formazione a monte di laghi temporanei o definitivi nelle Dolomiti, una zona dove la particolare morfologia dei versanti e la loro costituzione geologica hanno contribuito a rendere questo tipo di fenomeno relativamente frequente.

Nella letteratura geologica, invece, il numero delle frane di sbarramento in area dolomitica non è molto elevato: oltre che a dati reperibili in articoli scientifici ci si è avvalsi di dati di archivi storici, articoli di giornali locali, siti internet. Per ogni evento vengono descritte le caratteristiche legate al tipo differente di materiale coinvolto (roccia, detrito, terra) oltre che il tipo di frana (crollo o scivolamento).

Le principali variabili che interessano la formazione di laghi di sbarramento nelle vallate alpine sono l'assetto geologico (es. giacitura a franapoggio) e la composizione litologica con meccanismi di innesco (triggers) rappresentati da periodi di intense precipitazioni e terremoti, anche se il fenomeno sismico

in area dolomitica è meno frequente di altri territori italiani. Non bisogna però dimenticare che nelle Dolomiti sono note frane sismoindotte che hanno causato danni e sbarramenti fluviali in occasione di forti terremoti (1117 e 1348) con epicentri in zone vicine come il Friuli o il Bellunese. Non vengono prese in considerazione le numerose frane di sbarramento che dalla fine della glaciazione würmiana (Tardiglaciale e Postglaciale) hanno colpito l'area dolomitica con formazione di laghetti temporanei (es. paleolago di Pescosta in val Badia, paleolago di Agordo, ecc.) che, seppur di notevole interesse ambientale per una ricostruzione climatica, esulano da questa ricerca storica e sono già state oggetto di numerose pubblicazioni sulla loro datazione. Non viene qui analizzata la grande frana del Vajont del 1963, le cui cause sono dovute ad imperizia dell'uomo nel modificare un ambiente già di per sé propenso al dissesto. Vengono invece censite 34 frane avvenute in epoca storica, con una breve descrizione per permettere di comprenderne le cause: solo due sono state causate da scosse sismiche, mentre le restanti hanno trovato il loro innesco in eventi piovosi di lunga durata, a cui spesso si è associato lo scioglimento rapido della neve. Non va dimenticata l'azione dell'uomo, come nel caso della frana del Torrente Rebrut (Valle del Vanoi, TN) causata soprattutto dall'intenso disboscamento e dall'uso di deviare le sorgenti per uso irriguo.

CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE DI SBARRAMENTO

La prima classificazione ufficiale delle frane di sbarramento (*Landslide dams*) si deve agli autori Costa e Schuster che nel 1988 proposero un modello con sei tipi di movimenti franosi in relazione

alla distribuzione bidimensionale in una singola vallata. Pur risultando comodo per attribuire una frana di sbarramento ad una delle sei classi, venne in seguito ritenuta non sufficiente per la descrizione dell'evento: nel 2011 Hermanns et alii proposero un nuovo schema di classificazione basato sulla morfologia tridimensionale del corpo franoso in relazione alla valle sottostante occupata, mettendo in risalto la complessità di questi eventi quando avvengono in più fasi successive oppure alla confluenza di più corsi d'acqua con formazione di più laghi, senza tralasciare le deviazioni dei bacini spartiacque. In questo nuovo sistema di classificazione assume quindi importanza il profilo longitudinale della valle e la sezione trasversale della stessa (Hermanns et alii, 2011b). Non sempre questa complessità è facile da riscontrare sul terreno: molte frane antiche infatti sono state modificate dall'erosione o da interventi antropici volti a migliorare la sicurezza della zona: in questo caso risulta di fondamentale aiuto l'utilizzo di fonti storiche come cronache o, soprattutto, mappe topografiche del tempo per individuare forme del paesaggio che oggi non sono più presenti (es. stagni o specchi d'acqua nel corpo franoso prosciugati nel tempo, ecc.): questo può portare quindi a cambiamenti nell'attribuire un evento all'una o all'altra classe. Vediamo i principali tipi di frane di sbarramento proposti da Hermanns:

TIPO 1 – Lo sbarramento della valle è parziale e spesso sono presenti stagni (ponds) e depressioni sulla superficie del corpo franoso: questo tipo di accumulo interessa larghe vallate montane. (Es. frana 1)

TIPO 2 – Si tratta di una frana singola, che può avere anche forme diverse, che occupa tutto il letto del corso d'acqua e può risalire il versante opposto. Hermanns propone inoltre 5 sottotipi a seconda che ci siano frane in entrambi i fianchi di una valle, o che l'accumulo franoso possa meno ostruire solo l'alveo o anche i fianchi. Inoltre viene presa in considerazione l'ipotesi che, come accade per le frane in terre e detrito, il corpo franato si espanda lungo il fondovalle anziché risalire il versante opposto a quello di caduta. (Es. frane 13,15, 20)

TIPO 3 – Si tratta di sbarramenti multipli che possono portare alla formazione di più laghi. Hermanns suddivide questa categoria in due sottotipi a seconda che si tratti di laghetti all'interno dello stesso corpo di frana o che siano causati da più lingue franose lungo la valle. (Es. frana 14)

TIPO IV – A questa categoria, suddivisa in 5 sottotipi, appartengono le frane di sbarramento di grandi dimensioni che possono interessare anche più corsi d'acqua con formazione di laghi anche lungo le valli tributarie, specialmente in corrispondenza di confluenze con gli affluenti minori. (Es. frana 21)

TIPO V – In questo caso si assiste ad una deviazione dello spartiacque con il corso d'acqua interessato dalla frana che devia approfondendo altre vie, a volte incidendo il versante originario della valle principale. Viene comunque riconosciuto che si tratta di un evento raro rispetto ai precedenti.

Oltre a questi quattro tipi principali bidimensionali, Hermanns ne propone altri quattro che tengono conto della sezione trasversale e della morfologia della valle sottostante: in particolare viene dato risalto alla simmetria, se presente o meno, dei fianchi della valle e del corpo franoso che la ricopre. Altri quattro tipi di profili completano poi la classificazione delle frane di sbarramento in

considerazione delle dimensioni e della forma del corpo franoso lungo il fondovalle. La Fig. 1, tratta da Hermanns et alii del 2011b, racchiude tutti le possibili combinazioni per attribuire un evento ad una delle classi.

Tacconi Stefanelli et alii (2015) propongono inoltre tre tipi di classificazione dei laghi di sbarramento da frana: I) esistente o parzialmente interrato a monte del corpo franoso II) laghi scomparsi nel tempo III) laghi non formati a monte in quanto senza sedimenti lacustri.

FRANE STORICHE CON OSTRUZIONE DEL CORSO D'ACQUA E FORMAZIONE DI LAGHI NELLE DOLOMITI

1) IL SECOLO D.C. – (2890 CAL. BP) -MONTE PERÓN (BL)

La zona delle Masiere (Masiere in italiano = terreno sassoso, macereto), ubicata allo sbocco della Val Cordevolle nel Vallone Bellunese, ha da sempre

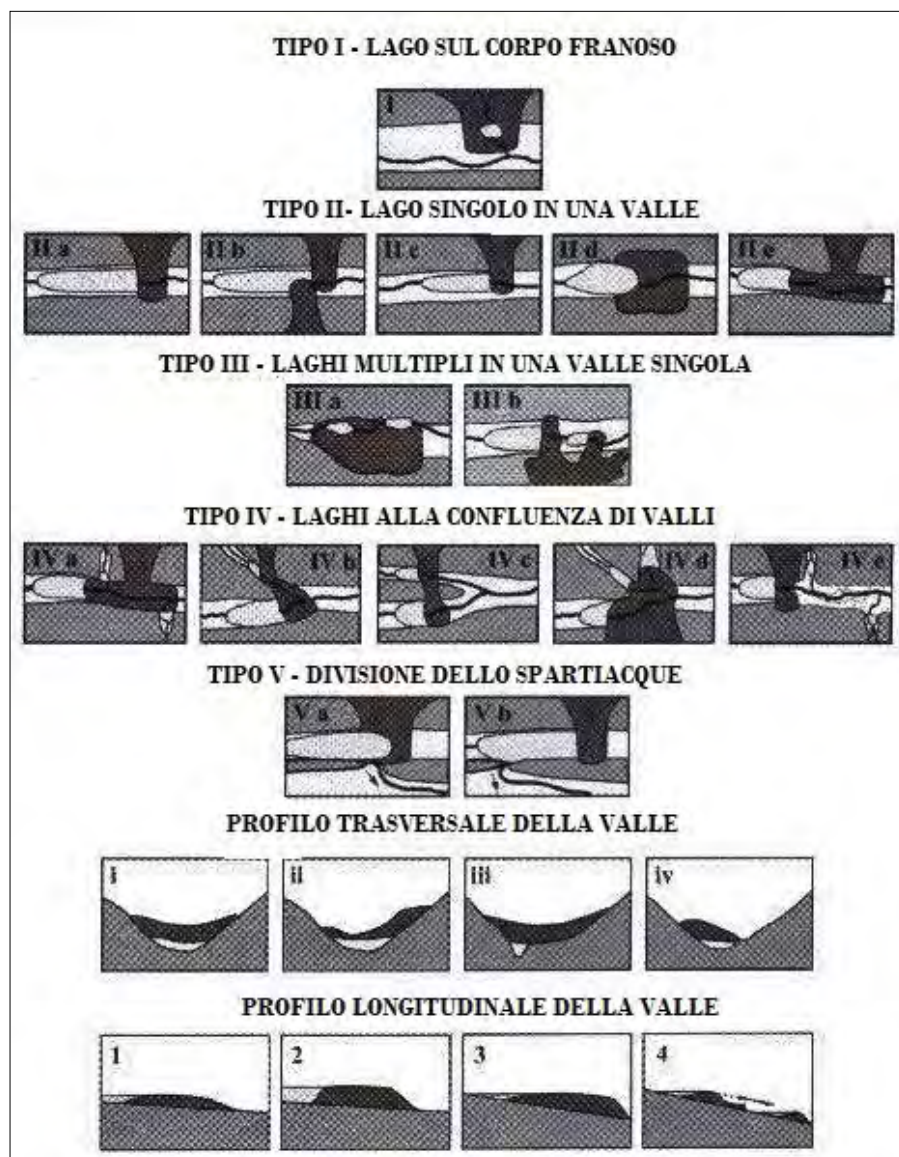


Figura 1. Schema tratto da Hermanns et alii (2011)

rappresentato un enigma nell'interpretazione della genesi del grande accumulo franoso. Sono state proposte diverse datazioni e cause, a partire da grandi scoscientimenti avvenuti dopo il ritiro dei ghiacciai würmiani dal Vallone Bellunese e Agordino, fino ad arrivare, con nuove tecniche isotopiche di datazioni, ad un'età compresa tra l'epoca tardo-romana e l'Alto Medioevo (Rossato, 2020). A questo risultato si aggiungono anche datazioni sui limi campionati sul fondo del Lago di Vedana (Zolitskha B. et alii, 2021): questo specchio d'acqua viene oggi considerato come un lago di sbarramento dovuto a terremoto (**Quake lake**) in quanto, a differenza delle vecchie interpretazioni che lo definivano di natura morenica, si sarebbe generato in seguito alla caduta della frana del Monte Perón probabilmente in seguito ad una scossa sismica: il paesaggio ondulato formato da dossi detritici ed avvallamenti viene interpretato come ambiente tipico delle grandi frane di crollo conosciute con il termine *Toma hummocky* di cui il Lago riempirebbe una depressione dopo lo sbarramento del T. Cordevole. Rossato (2021) calcola in circa 5,9 chilometri la distanza percorsa dai detriti dell'accumulo franoso, coprente un'area di 9 Km² con un'altezza variabile da 5 a 30 metri, per un volume totale di circa 0,17 km³. Il lago di Vedana, secondo l'autore, rappresenterebbe oggi una forma relitta di un più vasto bacino lacustre che arrivava fino alla zona di Torbe, in un contesto paleoidrografico molto complesso.

2) 339/340 D.C. - (VAL DI Fiemme, TN)

Si staccò una enorme frana da Valboneta, creando il Mosenè, seppellendo alcune case romane nella zona di Prediali presso la casa Bianca: venne sbarrato il corso del T. Avisio con formazione di un lago dove oggi sorge Predazzo.

3) V-VI SECOLO D.C. - FRANA DI BIGONTINA (CORTINA D'AMPEZZO, BL)

La frana si staccò dalle pendici del Monte Cristallo arrivando alla zona di Cortina: è stata datata (Panizza, 1986) grazie al ritrovamento di due tronchi tra 270+/-30 e 490+/-30 D.C. e 345+/-80 anni fa. Si bloccò il Torrente Boite con formazione di un piccolo lago effimero e costituisce il basamento su cui oggi sorge Cortina d'Ampezzo. Potrebbe essere avvenuta in coincidenza della grande alluvione definita dallo storico Paolo Diacono come "Nuovo Diluvio".

4) 944 D.C. - SANTA FOSCA (VAL FIORENTINA, BL)

In questo anno una frana di cui sono state perse le tracce precipitò nel T. Fiorentina con formazione di un piccolo lago effimero nella zona di Pescul. Sotto al cimitero di Santa Fosca sono venute alla luce peliti litificate sovrapposte ad altre probabilmente erose da un precedente deposito lacustre nella stessa zona anteriore al 944 D.C. La datazione è avvenuta grazie al ritrovamento di un tronco di legno nel deposito franoso. (Quattrocchi, 1994).

5) 7 DICEMBRE 1011 - TORRENTE GAVÓN (FALCADE, BL)

Una grande frana, ultima di una serie di eventi simili, scese dalla zona detta Le Marmolade (Falcade) con ostruzione del T. Biois e formazione di un lago effimero: fino al 1600 il Gavón non ebbe più un letto fisso e con la messa in posto della grande conoide franosa il torrente fu deviato verso il versante destro della valle cambiando percorso. (Del Din, 1986).

6) 7 GENNAIO 1114 O 1117 - SASSO BIANCO (VAL PETTORINA - ROCCA PIETORE BL)

Nell'anno 1117 gran parte dell'Italia settentrionale venne scossa da un forte terremoto che, secondo alcuni studi, potrebbe avere avuto l'epicentro nella zona di Verona. Le cronache parlano dell'anno 1114 anche se la prima data sembra essere più realistica per questo evento che fece precipitare una enorme frana di crollo dalla parete settentrionale del Sasso Bianco nel versante destro della Val Pettorina. Sotto l'enorme accumulo di blocchi dolomitici nella zona di Col di Rocca potrebbero trovarsi, come sostengono gli abitanti del luogo, i resti dell'antica chiesetta di San Pietro. In seguito allo sbarramento delle acque del T. Pettorina, si formò un lago che arrivò a lambire l'abitato di Sottoguda e, secondo la tradizione, il toponimo della frazione Palùe deriverebbe proprio da questo evento catastrofico. (Del Din, 1986).

7) 25 GENNAIO 1348 - MONTE AIARNOLA (PADOLA, COMELICO, BL)

In seguito al forte terremoto che la sera del 25 gennaio colpì tutta l'Italia nord-orientale, franò una parte del Monte Aiarnola nella zona della Croda di Campo e di Tacco: le cronache del tempo parlano di macerie che colpirono la villa di Padola con ostruzione del torrente omonimo e risalirono il versante

opposto fin oltre Dosoleto. Non sono note le dimensioni del lago formatosi in quell'evento, il cui epicentro fu localizzato in Carinzia.

8) 1493 - PRIMIERO (TN)

In seguito ad evento alluvionale di grande portata, vennero distrutti tutti i ponti e le strade della vallata del Primiero con carestia legata alla mancanza di viveri per le difficoltà di trasporto. Si formò anche un laghetto effimero a Mezzano in seguito allo sbarramento causato dalla piena del T. Noana. (Trotter, 1982).

9) 20/21 APRILE 1626 - MASAREI (LIVINALLONGO DEL COL DI LANA, BL)

Un movimento franoso ha interessato la zona di Bosco Verde nella Valle di Livinallongo del Col di Lana: ancora oggi il nome Masarei (Macereto), località posta al bivio con la strada che sale a Chèrz, ricorda questo evento, evidenziato sul terreno da grandi massi. Nei giorni tra il 20 ed il 21 aprile si staccò una frana dal pendio del Ru de Mont, seguita, pochi giorni dopo, da una seconda frana di dimensioni ancora maggiori. Risale a questi giorni (20 aprile) anche la cosiddetta Boa de la Crasta il cui corpo franoso forma il rilievo su cui è ubicata la chiesetta di Renàz, seguita il 25 dello stesso mese da una seconda frana che distrusse il Maso Grone: alla combinazione di questi eventi si deve lo sbarramento del Cordévole con la formazione di quegli estesi depositi terrazzati a monte del corpo franoso indicanti la presenza di uno specchio lacustre. (Del Din, 1986).

10) 1728 - PRIMIERO (TN)

In seguito ad intense piogge venne sbarrato il Cismon in corrispondenza della Val de Schivi con allagamento della cittadina di Fiera. (Trotter, 1982).

11) 2 MAGGIO 1730 - CHIAPUZZA (SAN VITO DI CADORE, BL)

Una frana si staccò da Sanbodo (Croda Marcora) precipitando sulla frazione di Chiapuzza. Venne sepolta la chiesa della Salute e perirono 34 delle 54 famiglie originarie. Si formò un laghetto effimero sul Boite della durata di 24 ore con arretramento dell'acqua di circa due miglia. Nello stesso luogo cadde una seconda frana il 2 maggio 1774. (Brentari O., 1886).

12) 1748 - VALLE DI SAN LUCANO (TAIBON AGORDINO, BL)

In località Pónt, nella Valle di San Lucano, sono venuti alla luce, in segui-

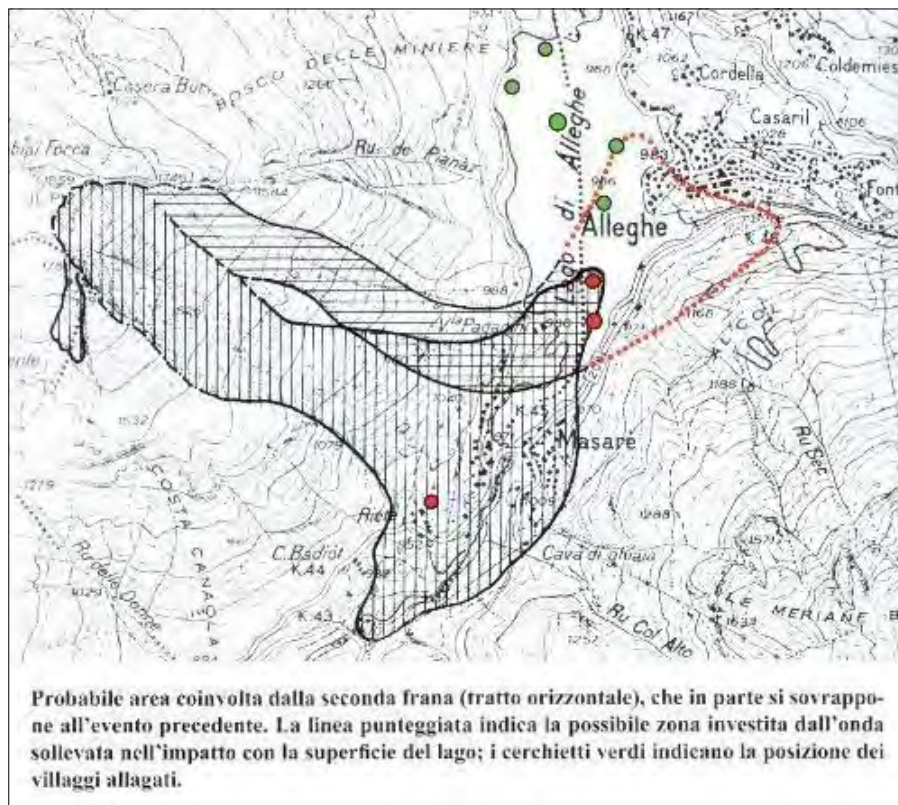


Figura 2. La frana di Alleghe con la forma in pianta riconducibile al Tipo 2e. Tratto da Fontanive G., 2021

to all'alluvione del novembre 2018 nota come "Tempesta Vaia", i resti di limi lacustri già attribuiti in passato da alcuni studiosi locali al fondale di un piccolo laghetto che avrebbe sbarrato il corso del T. Bordina che da qui scende a confluire nel T. Tegnàs. Recentemente questi sedimenti sono stati attribuiti ad uno sbarramento glaciale ad opera della lingua che scendeva dalla Val Reiane. Non è invece da escludere che lo sbarramento delle acque sia legato all'evento disastro-

so che nel 1748 sconvolse l'intera area dolomitica e l'Agordino in particolare. Le vecchie cronache parlano infatti di una vasta frana che bloccò le acque che poi, a causa dell'elevata pressione sulla soglia, con una grande ondata travolse tutti gli edifici a valle causando la fine delle attività minerarie in zona. (Del Din, 1986) Ulteriori studi e datazioni permetteranno in futuro di datare questi limi per la ricostruzione geomorfologica della Valle di San Lucano.

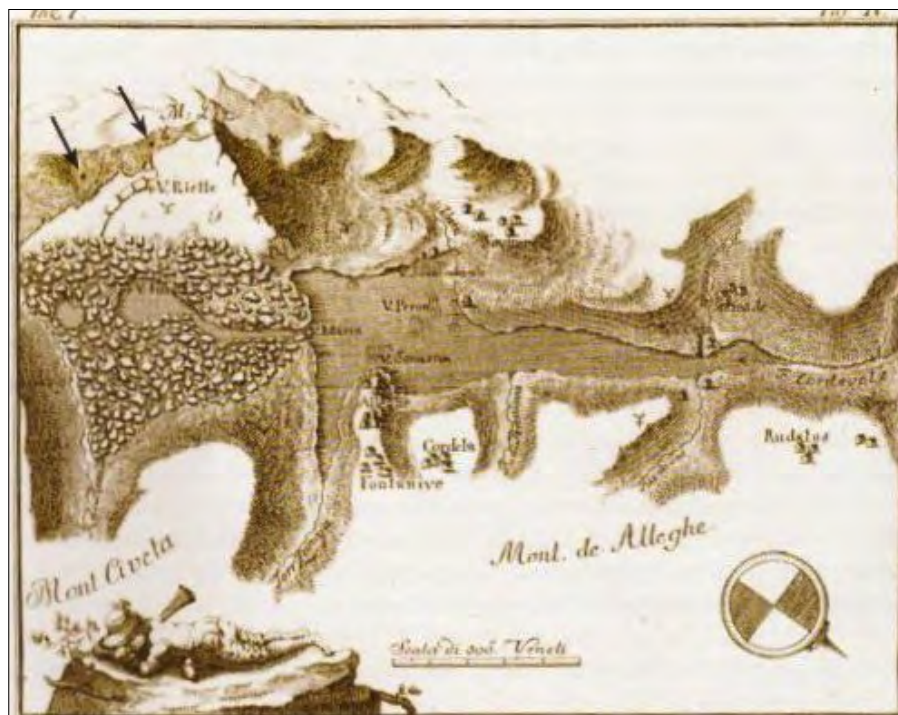


Figura 3. La frana di Alleghe in un'illustrazione del 1785 di B. Hacquet in cui si notano i laghetti formatisi sul corpo franoso. Tratto da Fontanive G., 2021

13) 11 GENNAIO 1771- ALLEGHE (BL)

Il giorno 11 gennaio 1771 una massa rocciosa del volume di circa 30 milioni di metri cubi precipitò dal fianco orientale del Monte Piz, nei pressi di Alleghe, ostruendo il letto del Torrente Cordevole. Nacque allora il Lago di Alleghe, uno degli specchi d'acqua più suggestivi delle intere Dolomiti. Vennero distrutti tre villaggi ed altri cinque furono sommersi successivamente dalle acque accumulate a monte della frana. Ci furono 49 vittime e molte persone vennero evacuate in altre località vicine. Probabilmente prima del Lago di Alleghe esisteva un altro specchio lacustre più antico come dimostra il toponimo Masarè (Macereto) esistente su un documento cartografico del 1713. Una seconda frana (Del Negro, 2011) interessò lo stesso versante il 1° maggio con la caduta di materiale nelle acque del lago formatosi alcuni mesi prima, profondo, nella zona di Masarè, circa una novantina di metri: ci furono quattro vittime e venne danneggiata la chiesa di Alleghe. Questo secondo evento testimonia della pericolosità legata alla presenza di specchi d'acqua formatisi dopo uno sbarramento fluviale. (Figg. 2 e 3).

**14) 3 MAGGIO 1792 - TORRENTE
MISSIAGA (LA VALLE AGORDINA,
BL)**

Alle ore 3 della notte del 3 maggio 1792 una enorme frana investì la frazione di Lantrago (La Valle Agordina) dopo che i piccoli laghetti formati in seguito alla frana del 12 dicembre dell'anno precedente franarono l'uno dentro all'altro per poi esondare di colpo verso l'abitato. Infatti nel 1791 lo sbarramento del Torrente Missiaga aveva provocato la formazione di alcuni piccoli laghetti *"L'aque si erra fermate ed avevano formato alcuni laggetti sospetavano di che intervenisse qualche scherzo come di fatto lo fu"* (Nobiloni A. 2022). Per fortuna non si registrarono vittime in quanto gli abitanti, a differenza dell'anno 1701 quando una frana nella stessa zona provocò 48 morti, riuscirono a mettersi in salvo.

**15) 1793 - VALLE DEL REBRUT
(PRIMIERO, TN)**

Primo franamento nella Valle del "Rio Brutto" (Rebrut) dovuto al disboscamento ed alla natura delle rocce argilloso-micacee. Si aprì una grande frattura nel terreno che sprofondò per una decina di metri. Questo evento costituisce il "prodromo" al grande fra-



Figura 4. La frana del Rebrut riprodotta nell'articolo di Gilli (2014)

mento del 1825/26. Piccoli movimenti del terreno erano comunque già cominciati nell'agosto 1748, anno di grandi alluvioni in tutto il territorio dolomitico: le cause di questi primi cedimenti sono state attribuite all'eccessivo disboscamento e all'uso di deviare le sorgenti per irrigare i campi. (Trotter, 1982).

16) 21 APRILE 1814 - FRANA ANTELAO (BL)

Questa frana è rimasta famosa per aver distrutto gli abitati di Marceana e Taolen: caddero circa 35 milioni di metri cubi di materiale (Dolomia Principale e Calcarei Grigi) che andarono a colpire i detriti della frana del 1737 arrivando ad ostruire il T. Boite con formazione di un lago temporaneo. Ci furono 257 vittime e 62 sopravvissuti con 16 famiglie distrutte delle 54 originarie. (Neri et alii, 2007).

17) OTTOBRE 1820 - PERAROLO DI CADORE (BL)

Risale a questo periodo il primo movimento franoso che ancora oggi crea

preoccupazione agli abitanti di Perarolo: un crollo di rocce evaporitiche e calcaree (Formazione a Bellerophon) occuparono il letto del T. Boite. Venne allora deciso di costruire una barriera a protezione del paese e si contarono molte case inagibili. Da ricordare che nella stessa zona di Perarolo un altro evento alluvionale in data 16 ottobre 1708 distrusse abitazioni e ponti e, come ricordano le cronache del tempo, il paese "rimase come un osso senza carne né pelle".

18) 11 E 19 GIUGNO 1821 - SOTTRÙ (VAL BADIA, BZ)

La frana venne innescata da piogge intense e abbondanti nevicate. Il primo movimento si ebbe il giorno 11 giugno per arrivare ad un massimo il 19 dello stesso mese. Venne sbarrato il corso del T. Gàdera con la formazione di un laghetto temporaneo. Ci furono danni a 17 abitazioni nella frazione di La Muda e nel 1822 e 1833 il laghetto, chiamato Sompunt, venne svuotato per prevenirne il collasso. Lo sbarramento franoso

collassò definitivamente nel giugno del 1827 con alluvioni di detriti nei villaggi sottostanti. (Ghini et alii, 2014).

19) 13 OTTOBRE 1823 - PERAROLO DI CADORE (BL)

La notte del 13 ottobre piovve a dirotto: intorno alla mezzanotte ci si accorse che il T. Boite si era prosciugato. All'alba del giorno 14 una grossa frana scesa dal Monte Salina ostruì il corso del torrente con formazione di un lago effimero. Il fronte franoso cedette improvvisamente creando un disastroso effetto-diga con case crollate o danneggiate per colpa di circa due metri di ghiaie nei paesi sottostanti.

20) 1823/1882 - LAGO NUOVO (TORRENTE REBRUT, PRIMIERO, TN)

Questo evento calamitoso portò alla formazione del cosiddetto "Lago Nuovo" sul Torrente Vanoi: avvenne la distruzione definitiva del villaggio di Ponte in parte danneggiato dall'alluvio-

ne del T. Rebrut del 1823. Per molti mesi i versanti scaricarono detriti nell'alveo del T. Vanoi. L'anno 1825 viene ricordato per un evento legato ad un forte scirocco che portò allo scioglimento di masse di neve nella zona. Il 13 dicembre 1825 una colata di materiale detritico scese attraversando l'alveo del Vanoi che arrivò a soli 2 metri dalle abitazioni di Ponte. Il livello del corso d'acqua si alzò di 24 metri con la creazione del cosiddetto Lago Nuovo, lungo 444 metri, largo 74 metri e profondo 13 metri per una capacità d'invaso di circa 200000 metri cubi di acqua. Il 10 gennaio 1826 venne danneggiata la campagna da una forte alluvione, mentre il 27 aprile 1826 si contarono 27 abitazioni sparite ed altre parzialmente sepolte da frane a causa del T. Rebrut. Il 29 maggio solo una casa rimase sepolta a metà, tutte le altre crollarono. Il 31 maggio la località Remessori, tra la Canal di Sotto e la confluenza Lozen-Vanoi, venne distrutta: si contarono a fine evento 52 vittime e 238 sopravvissuti. Con la piena del 20 settembre 1829 lo sbarramento del T. Vanoi cedette in parte provocando lo scalzamento alla base del colle su cui era ubicata la chiesa e le opere costruite a difesa dei paesi. Il 1882 è passato alla storia per i lunghi periodi piovosi: il Lago Nuovo raggiunse la lunghezza di 1700 metri, larghezza di 400 metri e profondità di 20 metri con un invaso di circa 600000 metri cubi. Nella zona alta della Valle del T. Vanoi (Valcia) si formò un piccolo lago in zona Refavaie (detta I Laghetti) a seguito di una frana che però non resse alla pressione dell'acqua che andava accumulandosi: con uno spaventoso effetto-diga le acque non più trattenuate dalla soglia franosa irrupero nel Lago Nuovo facendo crollare lo sbarramento della frana del Rebrut del 1825: il lago finì così la sua esistenza. (La maggior parte dei dati sono tratti da E. Filippi Gilli come la Fig. 4).

21) 1833 - RU DELLE ROE (VAL DI ZOLDO)

Nei pressi del villaggio di Gavàz in Val di Zoldo si verificò un evento franoso che portò alla formazione di un piccolo laghetto: venne a modificarsi la confluenza tra il Ru delle Roe nel Torrente Duran, come evidenziato dalle mappe topografiche relative agli anni 1833 e 1866. La zona è stata soggetta a frane anche in tempi recenti (31 gennaio 1991) le cui cause sono da imputare, oltre che alle piogge, alle basse temperature dei mesi invernali (Govi *et alii*, 1993).

22) 12 GIUGNO 1879 - MORTIZ (O MORTIC) DI CANAZEI (TN)

Fu una primavera caratterizzata da forti temporali che portarono alla fuga dei residenti della zona: si aprirono fessure nei prati e si formò un lago temporaneo sopra la frazione di Pradell: era lungo 200 miglia e largo una trentina di pollici. La sua durata fu di tre giorni e ci vollero due settimane prima di tornare alla normalità. Del piccolo villaggio oggi rimane solo un capitello.

23) SETTEMBRE 1882 - TORRENTE RUDAN (CORTINA D'AMPEZZO, BL)

Si attivò un debris flow che distrusse mulini e segherie sul T. Rudan con un grosso blocco franato nel T. Boite: si tratta della stessa zona dove un fenomeno analogo nel 1983 portò alla formazione di un piccolo lago effimero nel T. Boite. (Neri *et alii*, 2007).

24) NOVEMBRE 1915 - (MONTE AGNÈR - TAIBON AGORDINO, BL)

Una frana si staccò dal versante settentrionale della catena del Monte Agnèr ostruendo per breve tempo il letto del Torrente Tegnàs in Valle di San Lucano. (Bozzo *et alii*, 1992).

25) 12 MAGGIO 1888 - BOA DE RUCAVÀ (COLLE SANTA LUCIA, BL)

Il giorno 12 maggio 1888 un'enorme quantità di detriti e massi si staccò dalla zona ad est dell'abitato di Colcúc (frazione di Colle Santa Lucia) e scese verso valle, ostruendo il letto del Cordévole, con la conseguente formazione di un lago di sbarramento a monte della soglia franosa. Questo evento è noto con il nome di "Boa de Rucavà" ed è stato molto importante perché in seguito le acque del Cordévole riuscirono ad erodere lo sbarramento depositando nell'arco di una notte il loro carico di detriti nella piana di Caprile. Il letto del Cordévole si innalzò notevolmente (oltre un metro) in una zona resa già pericolosa dalla confluenza di due torrenti, il Fiorentina ed il Pettorina, contribuendo ad esporre al rischio di alluvioni la zona di Caprile e Saviner di Laste. (Del Din, 1986)

26) 23 MAGGIO 1940 - MONTE DELLE ANIME (CENCENIGHE AGORDINO, BL)

Il Monte delle Anime sovrasta l'abitato di Cencenighe Agordino alla confluenza del Torrente Biois nel Torrente Cordevole. La parete rocciosa, costituita da dolomie molto fratturate della For-

mazione del Contrin, aveva già dato segnali di instabilità negli anni 1910 e 1937 e il giorno 23 maggio 1940 una enorme massa di blocchi rocciosi del volume di circa 30000 metri cubi precipitò nel fondovalle ostruendo il corso del T. Biois. In seguito a questo evento venne deciso di costruire una galleria stradale per bypassare la frana per poter accedere alla vallata del Biois. La confluenza dei due torrenti dolomitici a Cencenighe ha sempre costituito una zona di pericolo dal punto di vista idrogeologico in quanto anche il versante opposto al Monte delle Anime è costituito da rocce moto erodibili (Formazione di Werfen, Conglomerato di Richthofen, Calcari di Morbiach e Formazione del Contrin) affioranti nel contesto della grande frana postglaciale detta "Il Meseróž". (Manfroi, 2022)

27) 1942 - PERAROLO DI CADORE (BL)

Una grossa frana si staccò dalle pendici del Monte Zucco precipitando nel Boite causandone lo sbarramento: per fortuna non ci furono danni all'abitato di Perarolo. Con la piena del 1966 il corpo franoso venne eroso e rimobilizzato lungo l'alveo del torrente.

28) 28 MAGGIO 1951 - BOSCO DI AURÓNA (LIVINALLONGO DEL COL DI LANA, BL)

Una frana del volume di circa 50000 metri cubi scese dal versante del Bosco di Auróna in località Crepàz sbarrando il corso del T. Cordevole. Si formò un lago la cui durata è stata stimata in circa venti anni. Le rocce interessate da questo movimento di scivolamento appartengono alle formazioni anisiche qui affioranti verso il nucleo dell'Anticlinale del Cordevole. (Del Din, 1986)

29) 3 MAGGIO 1954 - RIO CUNETTONE (COMELICO SUPERIORE, BL)

In seguito a fenomeni meteorologici particolarmente intensi la conoide del Rio Cunettone sbarrò parzialmente il corso del Torrente Padola senza provocare per fortuna la formazione di un vero e proprio bacino a monte. (Bozzo *et alii*, 1992)

30) NOVEMBRE 1966 - RIO CODALÓNGA (COLLE SANTA LUCIA, BL)

In seguito alla tremenda alluvione che colpì i territori dolomitici nel novembre del 1966, numerosi fenomeni di dissesto provocarono danni in parti-

colare nell'Agordino e nel Primiero. In particolare venne sconvolta la zona di Valciarnara in comune di Colle Santa Lucia. Le forti piogge innescarono una grande frana che ostruì l'alveo del Torrente Codalunga: i detriti, le rocce e gli alberi contribuirono a creare una diga che, in seguito allo svuotamento improvviso del piccolo laghetto a monte dell'ostacolo, esplose danneggiando abitazioni e manufatti ubicati nei pressi del corso d'acqua.

31) Novembre 1966 – Torrente Fiorentina (Selva di Cadore)

Tra gli abitati di Selva di Cadore e Caprile, nella zona della frazione Fiorentina, una frana ostruì l'alveo del Torrente Fiorentina che però non portò alla formazione di un lago grazie al sollevamento del letto con la formazione di una barriera che deviò le acque con distruzione della strada di fondovalle.

32) SETTEMBRE 1983 – TORRENTE RUDAN (BORCA DI CADORE, BL)

In seguito ad un evento piovoso di particolare intensità venne distrutto il ponte del 1952 realizzato sulla strada regia: i detriti arrivarono al Torrente Boite ostruendolo con la formazione di un piccolo lago. La zona della confluenza del Torrente Rudan nel Torrente Boite è da sempre stata interessata da fenomeni franosi ed alluvionali che ne hanno compromesso la stabilità.

33) 5 SETTEMBRE 1997 – FIAMES (CORTINA D'AMPEZZO, BL)

In seguito ad un evento meteorologico particolarmente intenso (15 minuti con oltre 1mm al minuto di pioggia) si mise in movimento una colata detritica (debris flow) con una quantità di detrito tra 10000 e 12000 metri cubi di Dolomia principale che sbarrò il corso del Torrente Boite. Il fenomeno fa parte di una serie di eventi simili che colpiscono la zona da molto tempo, come dimostra l'andamento sinuoso del corso d'acqua e la piana alluvionale a monte della località cortinese.

34) 18 NOVEMBRE 2000 – FRANA DI SANT'ANDREA (O BUSA DEL CRISTO)

La frana è avvenuta durante un periodo di intense precipitazioni (danni notevoli in tutta l'area dolomitica ed in particolare nell'Agordino) ed ha interessato le rocce gessose della Formazione a Bellerophon: sono stati individuati

due piani di scorrimento rotazionale. Il volume delle rocce e dei detriti è stato valutato in circa 3000 metri cubi ed il corpo franoso ha ostruito il corso del T. Boite con conseguente formazione di un lago di sbarramento. Viene evacuato il centro di Perarolo con chiusura precauzionale della ferrovia. Le cause dei continui cedimenti fino al collasso della massa rocciosa sono da ricercarsi nell'interfaccia tra copertura detritica e rocce gessose del substrato. Nel mese di febbraio 2021 la frana si rimise in movimento costringendo la prefettura bellunese ad emanare un'ordinanza per vietare escursioni, sostare sui ponti e nelle aree a rischio allagamento nei comuni rivieraschi del Fiume Piave a valle del paese di Perarolo. Per mettere in sicurezza l'abitato messo già in pericolo dalla frana dell'anno 2000 e risparmiare altri disagi alla popolazione, il giorno 25 aprile 2021, con circa 800 Kg. di tritolo, venne fatta esplodere parte del corpo roccioso instabile, con un distacco di circa 10000 metri cubi dalla parete, corrispondenti a oltre 15000 metri cubi di detrito. La portata del Torrente Boite venne ridotta dai circa 10 metri cubi al secondo a circa 5 metri al secondo.

BIBLIOGRAFIA

- BERGER A.R. (1997), *Assessing rapid environmental change using geoindicators*. Environmental Geology 32, 36-44.
- BOZZO G.P., FRIZ C., PASUTO A., SILVANO S. (1992), *Studio su centri abitati instabili della Regione Veneto: cronologia dei dissesti e rischio geologico*. Mem. Sci. Geol., Vol. XLIV, Padova.
- BRENTARI O. (1886), *Guida storico-alpina del Cadore*. Ristampa anagrafica, Atesa Editore, 1986.
- COSTA, J. E., AND SCHUSTER, R. L. (1988), *The formation and failure of natural dams*. Geological Society of America Bulletin, 100, 1054-1068.
- MARIA DEL DIN DALL'ARMI (1986), *Dissesti idrogeologici ed eventi calamitosi nell'Agordino dal 1000 al 1966*. Circolo Culturale Agordino, Istituto bellunese di ricerche sociali e culturali Editore.
- DEL NEGRO GIO-MARIA (2011), *Il lago di Alleghe. Tragedia e fascino*. Alleghe: Allegue del Civetta Editore, stampa 2007; Union de Ladin de Alie Editore.
- FONTANIVE G. (2021), *La formazione del Lago di Alleghe. Studio storico e geologico*, Tipografia Castaldi, Agordo.
- GILLI E. (2014), *La frana del Rebrut*. Le Aquile n.1. www.aquilemagazine.it
- GHINOI, A., FREDDI, R. PASUTO A. & SOLDATI (2014), *Geomorphological analysis of the historic landslide of Sottrù (Badia Valley, Italy) reactivated on December 13, 2012*, International Conference Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards, 18-19 November 2014, Padua, Italy
- GOVI, M., PASUTO, A., SILVANO, S. & SIORPAES, C., (1993), *An example of a low-temperature triggered landslide*. Engineering Geology, 36, pp.53-65.
- HERMANN, R.L., HEWITT, K., STROM, A., EVANS, S.G., DUNNING, S.A., SCARASCIA-MUGNOZZA, G. (2011), *The Classification of Rockslide Dams*. In: EVANS, S., HERMANN, R., STROM, A., SCARASCIA-MUGNOZZA, G. (eds), *Natural and Artificial Rockslide Dams*. Lecture Notes in Earth Sciences, vol 133. Springer, Berlin, Heidelberg. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/978-3-642-04764-0_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04764-0_24)
- MANFROI L. (2022), *Bella terra del mio Agordino*. Autopubblicato Youcanprint
- NERI ET ALII. (2007), *Note illustrative del Foglio geologico 029 alla scala 1:50000-Cortina d'Ampezzo*. APAT, Regione Veneto.
- NOBILONI A. (a cura di) (2022), *I grandi disastri del '700 a La Valle Agordina*. Nel manoscritto di Luigi De Col Tonella. Autopubblicato Lulu.com
- PANIZZA M., ZARDINI R., SPAMAPANI M. (1986), *La grande frana su cui è sorta Cortina d'Ampezzo*. Edizioni Dolomiti, Cortina.
- QUATTROCCHI S. (1993/1994), *Geomorfologia dell'Alta Val Fiorentina e zone limitrofe (Dolomiti Orientali)*. Tesi non pubblicata Università degli Studi di Modena.
- ROSSATO S., MARTIN S., IVY-OCHS S., VIGANÒ A., VOCKENHUBER C., RIGO M., SURIAN N. E MOZZI P. (2018), *Post-LGM catastrophic landslides in the Dolomites: when, where and why*. Alp. Mediterr. Quat., Vol. 31, 239-242. <https://doi.org/10.26382/AIQUA.2018>.
- ROSSATO S., IVY-OCHS S. ET AL. (2020), *Timing, drivers and impacts of the historic Masiere di Vedana rock avalanche (Belluno, Dolomites, NE Italy)*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 20, 2157-2174. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2157-2020>.
- TACCONI STEFANELLI, C., CATANI, F. & CASAGLI, N. (2015), *Geomorphological investigations on landslide dams*. GEOENVIRON DISASTERS 2, 21 <https://doi.org/10.1186/s40677-015-0030-9>
- TROTTER CORRADO (1982), *Tra fiumane ed alluvioni. 1882. L'an de la brentana*. Editore Alcione, Trento.
- ZOLITSCHKA, B., POLGAR, I.S. & BEHLING, H. (2022), *Created by the Monte Peron rock avalanche: Lago di Vedana (Dolomites, Italy) and its sediment record of landscape evolution after a mass wasting event*. Landslides 19, 297-311 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01787-2>

Difesa e riqualificazione di habitat costieri nel Parco Nazionale del Circeo – Un esempio di progettazione di ingegneria naturalistica

Coastal habitat defense and restoration in the Circeo National Park – Soil bioengineering design example

Federico Boccalaro

SIGEA Lazio - ORDING Roma

Commissione Ingegneria Naturalistica

(presidente commissione), AIPIN Lazio

(presidente sezione)

E-mail: federico.boccalaro@libero.it

Federica Marsiali

Architetto paesaggista – AMBIENTE spa,

AIPIN Lazio

Parole chiave: Ingegneria naturalistica, habitat costieri, opere di difesa suolo, trapianto di vegetazione

Key words: Soil bioengineering, coastal habitat, soil defense works, vegetation transplant

PREMESSA

L'Ente Parco Nazionale del Circeo, anche a seguito delle recenti ed intense mareggiate che hanno comportato evidenti fenomeni di erosione costiera che si sono andati a sommare con lo stato di alterazione degli habitat costieri presenti e caratterizzanti le dune del Parco Nazionale del Circeo, ha approvato – con Deliberazione del Consiglio Direttivo n.12 del 14/03/2018 – oltre ad alcune direttive operative di manutenzione ordinaria dirette agli operatori balneari per contrastare i fenomeni erosivi, un intervento a carattere sperimentale di ricostituzione della duna erosa da attraversamento umano e ruscellamento di acque meteoriche.

Tali direttive operative e il succitato intervento sono stati assentiti, in data 14/03/2018, anche dal Comune di Sabaudia per il tramite dei vari Settori interessati tra cui quello dell'Urbanistica e SUE, dei LL.PP., nonché del Patrimonio e Demanio Marittimo.

L'intervento in oggetto risulta localizzato entro un tratto del cordone dunale di estensione complessiva di circa 200 ml in loc. Caterattino – Comune di Sabaudia (vedi figura) e in particolare interessa il piede dunale e tre zone all'interno di tale tratto in cui sono presenti dei canali erosivi della duna (vedi figure).

Tali interruzioni del cordone dunale sono state causate dall'attraversamento antropico incontrollato nonché, almeno per uno dei tre, dal dilavamento delle acque meteoriche convogliantesi a causa della pendenza della strada lungomare.

A tale scopo l'Ente Parco Nazionale del Circeo ha dato incarico all'ing.

PIN Lazio e presidente Commissione Ingegneria Naturalistica dell'Ordine degli Ingegneri di Roma e Provincia)

di sviluppare il progetto definitivo ed esecutivo degli interventi antierosivi e di rivegetazione programmati.



Figura 1. Sito SIC "Dune Del Circeo" (da MinAmbiente, 2004)



Figura 2. Ortofoto e IGM (da F.Boccalaro, 2020)



Figura 3. Ortofoto (da F.Boccalaro, 2020)

MOTIVAZIONI

Il ripristino della duna e la protezione dei depositi embrionali al piede della stessa è derivato dal fatto che la duna, sormontata dalla strada litoranea, realizzata negli anni '30 del secolo scorso, è soggetta all'impatto del turismo ed a quello dell'erosione marina.

In passato, la strada asfaltata, oltre a rappresentare un elemento rigido in un contesto che dovrebbe essere "elastico", provocava il ruscigliamento delle acque

piovane, con conseguenti solchi di erosione tra la duna e la spiaggia. Le persone che frequentavano la spiaggia contribuivano, con il loro calpestio, ad approfondire tali solchi e a crearne di nuovi.

Il vento faceva la sua parte, incanalandosi ed erodendo a sua volta la duna.

Al piede della duna, a causa dell'utilizzo della spiaggia e della pulizia meccanizzata erano quasi scomparse le dune embrionali con la relativa vegetazione erbacea, importanti per smorzare i venti

paralleli alla costa e la spiaggia, appiattendosi, aveva perduto il profilo naturale.

In questo contesto l'erosione marina ha potuto provocare gravi danni arrivando anche a far crollare tratti di strada che si è stati costretti a interdire al traffico.

OBIETTIVI

Gli obiettivi specifici del presente intervento consistono nel ripristino e salvaguardia della duna litoranea mediante interventi ed opere basati sull'impiego di materiali naturali ai fini della mitigazione dei meccanismi erosivi, l'enfatizzazione di quelli deposizionali e l'innescio dei processi naturali di ricolonizzazione delle aree in dissesto ad opera della vegetazione dunale.

Gli obiettivi generali del presente intervento si inquadrano nel processo di gestione adattativa al territorio, e nello specifico alle peculiarità del territorio costiero.

- regolamentazione delle modalità di pulizia dell'arenile;
- istituzione di una zona di rispetto del piede dunale entro cui interdire tutte le modalità di pulizia meccanizzata;
- supporto alla sperimentazione di azioni gestionali di tutela della duna.

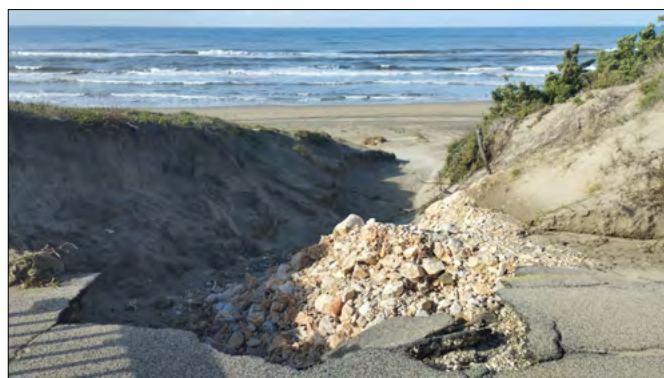


Figure 4, 5, 6, 7. Rilievo fotografico (da F.Boccalaro, 2020)

La gestione degli impatti antropici sulla struttura di un habitat dunale è ulteriormente supportata da:

- contenimento del frazionamento dell'habitat dunale;
- contenimento dell'impatto da calpestio sulla vegetazione dunale;
- contenimento del consumo di suolo sul fronte dunale;
- contenimento della diffusione di specie vegetali "aliene" sulla duna;
- "riutilizzo" delle sabbie derivanti dalla manutenzione della costa nel sistema sedimentario spiaggia-duna;
- azioni di comunicazione e sensibilizzazione sul valore ambientale e funzionale della duna, adeguatamente supportate da cartellonistica in situ.

fenomeni erosivi si concentrano in particolare nel tratto antistante i laghi di Caprolace e Monaci.

Il sistema spiaggia-duna del PNC si estende da Capo Portiere a Torre Paola per circa 25 km, rappresentando circa il 50% dell'estensione dell'intera unità fisiografica (vedi figura).

Le dinamiche sedimentarie che caratterizzano tale paraggio, e in particolare l'Area 4 (nei pressi della foce di Rio Martino), sono essenzialmente il risultato delle agitazioni ondose dai quadranti occidentali che, in funzione dell'orientazione specifica all'interno della falcata litorale, inducono una corrente di deriva litoranea netta diretta verso sud, stimata in 25-40.000 mc annui per anno.

Dal punto di vista della pressione turistica l'area rappresenta un tratto a massima frequentazione (stima di 4 persone/m²).

Le tipologie di concessioni demaniali presenti sono stabilimenti balneari e strutture di ricezione turistica. L'impatto sul sistema dunale assume i suoi massimi valori. La gestione ordinaria della pulizia dell'arenile è condotta dagli operatori degli stabilimenti balneari per le aree di loro competenza e per il restante arenile dall'amministrazione comunale.

Il Piano del Parco identifica quest'area come "riserva generale orientata - B4" in cui le attività economiche produttive dovrebbero integrarsi nei generali obiettivi di conservazione.

Le variazioni volumetriche della porzione di arenile antistante il fronte dunale (fascia 1,5-1,0m) evidenziano una marcata tendenza erosiva, con variazioni che assumono massimi valori di perdita durante la stagione balneare 2015 e 2016.

L'ampiezza della spiaggia oscilla intorno al valore medio di 20m (vedi figura) ed è caratterizzata da un'alternanza di avanzamenti e arretramenti tipici di tratti litoranei in cui si sviluppano e migrano lungo costa delle "onde di sabbia". Tale fenomeno trova una sua contestuale rappresentazione nella porzione sommersa della spiaggia, caratterizzata dall'alternanza di "buche e secche" anch'esse migranti lungo costa.

Una siffatta conformazione morfologica, sebbene molto impattante sull'attuale infrastrutturazione e fruizione della spiaggia e della duna, è espressione delle dinamiche tipiche di questa specifica porzione di litorale, contraddistinta da valori di pendenza dei fondali e obliquità al moto ondoso sensibilmente differenti dalla porzione settentrionale (si veda tabella).

Per tale motivo il fenomeno della migrazione "delle buche" ha sempre caratterizzato questo tratto litoraneo (Pallottini, 2005).

L'area 4 quindi evidenzia una tendenza erosiva su tutte le fasce di quota per una perdita complessiva di 6 mc/m. La percentuale di variazione volumetrica della fascia [1,5-1,0m], che esprime la porzione "fruibile" dell'arenile, raggiunge qui il valore massimo negativo (- 35,4%) rispetto ad altre aree. La porzione rappresentativa dell'area con maggior carico turistico (Area 4) evidenzia una diminuzione progressiva della volumetria di spiaggia nella sua fascia più "fruibile".



Figura 8. Localizzazione delle aree di intervento (da F. Boccalaro, 2020)

ASPETTI GEOMORFOLOGICI

Un primo nucleo del cordone dunale litoraneo del Parco Nazionale del Circeo si è formato circa 10.000 anni fa ed ha un'estensione di circa 25 km, una larghezza media di 250 m, un'altezza media di 12 m, con un minimo di 10 m e un massimo di 27, presso Torre Paola. Dune e spiaggia sono dunque costituite in parte da sabbie fossili, deposte nella zona in epoche passate, e recenti, ormai stabilizzate.

La duna separa i quattro laghi costieri dal mare, formando un'ampia insenatura che si protende fino ad Anzio. La spiaggia ha un'ampiezza media di circa 200 m, mentre le dimensioni della duna diminuiscono procedendo da sud verso nord; l'intera area è soggetta ad intensi fenomeni erosivi che hanno determinato la chiusura al traffico, circa venti anni fa, di un tratto della strada costiera. I

Localizzata nel tratto litorale di pertinenza del Comune di Sabaudia, l'Area 4 oggetto di studio e riferimento per l'area di intervento ad essa molto prossima, rappresenta le caratteristiche morfologiche e idrodinamiche tipiche della porzione meridionale della falcata litorale.

Le dimensioni del corpo dunale assumono le massime dimensioni, la pendenza dei fondali assume il suo valore massimo e l'obliquità dell'area assume il valore minimo (vedi tabella). Il sensibile cambio della morfologia dei fondali impartisce a quest'area una dinamica caratterizzata da una prevalenza di circolazione a celle, ovvero contraddistinta da flussi idrodinamici diretti prevalentemente perpendicolarmente a costa, le cosiddette "buche". L'area di misura si localizza all'interno del tratto di litorale limitato dal canale Caterattino e da Torre Paola, per una lunghezza complessiva di circa 7 km (vedi figura).

La compromissione strutturale dell'area 4, sia in termini geomorfologici che di pressione d'uso è ben evidenziata dal comportamento "erosivo" di quest'area evidenziato in tutte le analisi.

L'areale di misura si localizza nella porzione di arenile limitrofo alla struttura alberghiera "Oasi di Kufra" (vedi figura). Dal punto di vista della pericolosità geomorfologica, l'areale costiero afferente al PNC risulta classificato in: ii) area di "attenzione geomorfologica" lungo tutta la zona frontale del sistema dunale; iii) aree a "tutela per il pericolo di frana" lungo porzioni del fronte dunale tra Rio Martino e la Strada della Lavorazione e la porzione limitrofa al Ponte di Sabaudia.

Concludendo, l'erosione costiera interessa quasi tutta la lunghezza del litorale all'interno del sito e si manifesta con un aumento della pendenza del profilo antedunale, accentuato anche dalla pulizia meccanica della spiaggia, e in sostanza con la scomparsa della duna mobile embrionale. I suoi effetti sono deleteri anche per l'equilibrio della falda acquifera.

Oltre alla notevole valenza naturalistica, le dune sabbiose rappresentano un importante sistema di protezione delle zone litoranee in quanto i cordoni dunali fronteggiano le grandi maree di tempesta, ostacolano l'avvicinamento delle onde più grandi, impediscono il danneggiamento delle opere rivierasche e l'inondazione di zone interne. Le dune

costituiscono anche una riserva di sabbia che rifornisce la spiaggia in occasione delle tempeste eccezionali e rappresentano un elemento di tutela delle falde dulcacquicole costiere.

ASPETTI PEDOLOGICI

I suoli che si originano sulle Dune Recenti sono caratterizzati da una composizione granulometrica prevalentemente sabbiosa. Ad esempio, nella zona di Capo Portiere (Latina) le percentuali sono le seguenti: sabbia 88%, limo 6% e argilla 6%, ma in altri luoghi la sabbia può essere in quantità superiori e l'argilla mancare del tutto.

Nel complesso questi suoli sono dotati di scarsa fertilità, che però può essere incrementata mediante idonei interventi agronomici.

Infatti, i pregi sono: la scioltezza e quindi la facile lavorabilità, l'assenza di scheletro, l'elevata profondità, la prontezza con cui reagiscono ai fertilizzanti. Inoltre, grazie alla sua scioltezza, è possibile lavorare anche il substrato.

I difetti stanno nella povertà di humus e di elementi nutritivi e nel valore molto basso della capacità idrica di ritenuta e quindi nell'elevata aridità. Si può ovviare a ciò mediante concimazione e irrigazione abbondanti.

ASPETTI CLIMATICI

La fascia costiera del Circeo rientra nella Regione climatica meso-mediterranea e, secondo la classificazione in Regioni fitoclimatiche, (Blasi 1994), nella Regione Termo/Mesomediterranea Secca. In tale settore bioclimatico la distribuzione delle piogge presenta un massimo in novembre ed un minimo nei mesi di giugno e luglio, con un tipico andamento mediterraneo.

L'andamento delle precipitazioni da un anno all'altro è alquanto variabile, analogamente ad altre aree a clima mediterraneo.

Per la caratterizzazione climatica della zona in esame sono stati utilizzati i dati della stazione di Capo Circeo (6 m s.l.m.) pubblicati negli Annali idrografici del Servizio idrografico del Ministero dei LL.PP., integrati con quelli pubblicati dall'ISTAT, Annuario di statistiche meteorologiche, relativi alla distribuzione della temperatura dell'aria, alle precipitazioni medie mensili ed annue e al numero dei giorni piovosi.

Il periodo di riferimento di tali dati, che va dal 1961 al 1990, è sufficientemente lungo per consentire di individuare con affidabilità le caratteristiche climatiche del territorio.



Figura 9. Atlante delle Coste: estratto sul Circeo (da CNR, 2006)

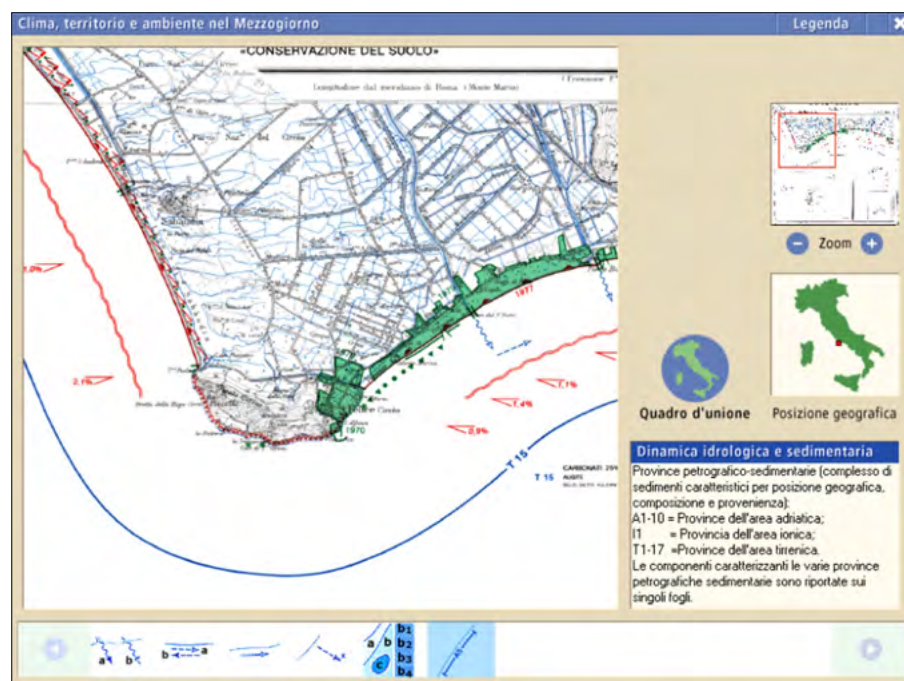


Figura 10. Carta della pericolosità idrogeologica PAI (ISPRA, 2019)

Di seguito, vengono rappresentati due diagrammi climatici risultati dall'elaborazione dei dati raccolti, effettuata con il software DIACLI della Russi Software S.r.l., e precisamente: il diagramma ombrotermico e il climogramma di Peguy per un'efficace, immediata lettura e comprensione dei fenomeni climatici.

Dal diagramma ombrotermico di Baugnouls e Gaussen è facile constatare come il periodo annuale da considerare "arido" è quello in cui la curva delle precipitazioni scende al di sotto di quella delle temperature, ossia quando la quantità delle precipitazioni è inferiore al valore doppio della temperatura ($P < 2T$), periodo che va dai primi di maggio a settembre.

ASPETTI FLORISTICI-VEGETAZIONALI

Dal punto di vista naturalistico-vegetazionale, come riportato nei lavori di Acosta et al. (2000b) e Blasi et al. (2002), le dune costiere del PNC comprendono i principali raggruppamenti vegetali descritti per le coste sabbiose del Mediterraneo e riconducibili a specifici Habitat di Direttiva:

- Habitat 1210 – Vegetazione annua delle linee di deposito marine;
- Habitat 2110 – Dune embrionali mobili;
- Habitat 2120 – Dune mobili del cordone litorale con presenza di *Amphiphila arenaria*;
- Habitat 2210 – Dune fisse del litorale;
- Habitat 2230 – Dune con prati dei Malcolmietalia;
- Habitat 2250* – Dune costiere con *Juniperus* spp.

Lungo la costa del Circeo troviamo rilevanti esempi di vegetazione psammofila con la relativa serie delle dune costiere, dalla vegetazione della spiaggia (fortemente danneggiata da irrazionali interventi di ripulitura) a quella a macchia mediterranea delle dune stabilizzate.

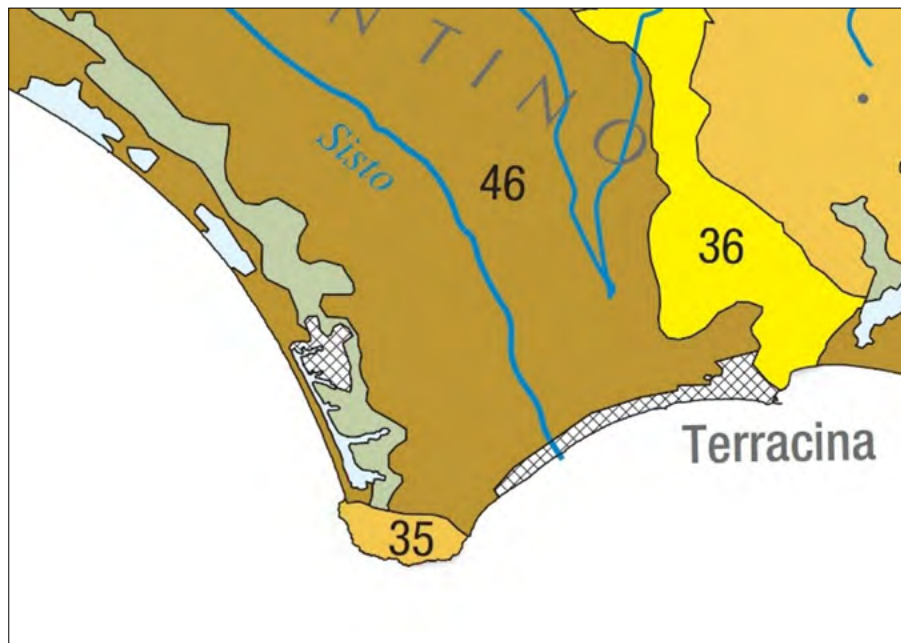


Figura 11. Carta dei suoli d'Italia: Circeo (ISPRA, 2019)

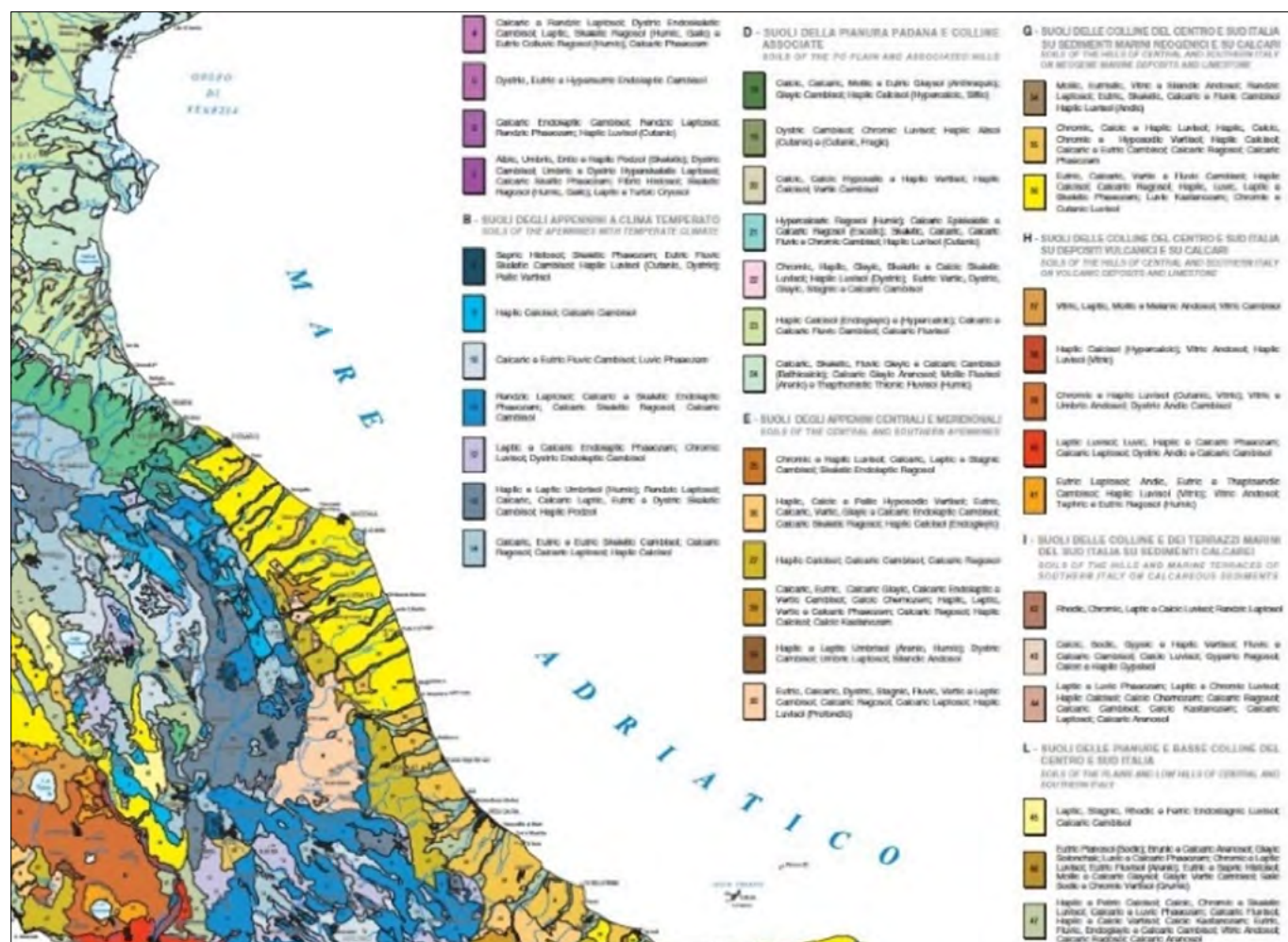


Figura 12. Carta dei suoli d'Italia: legenda (ISPRA, 2019)

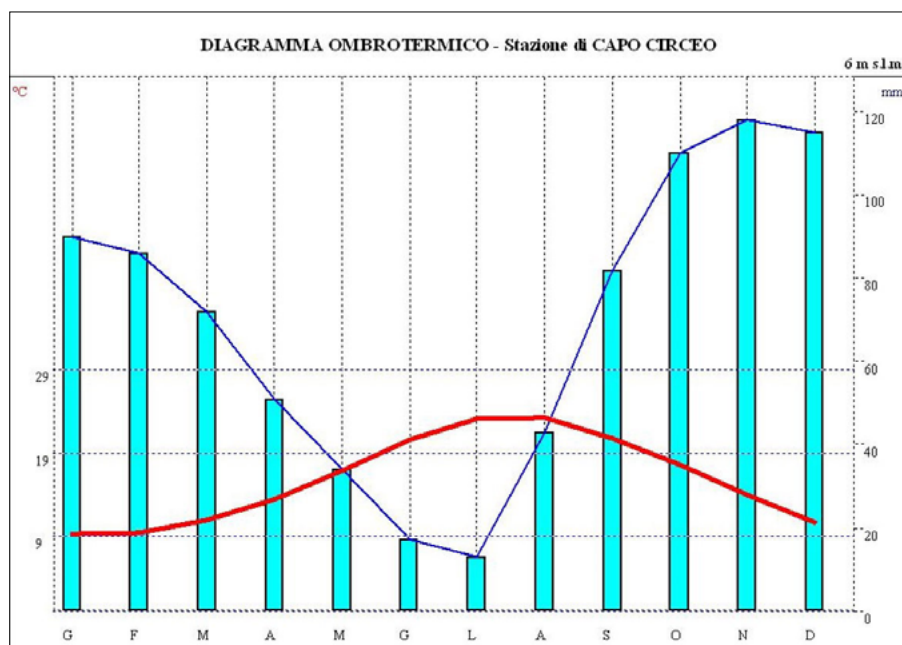


Figura 13. Diagramma ombrotermico per la stazione di Capo Circeo (6 m s.l.m.) (-)

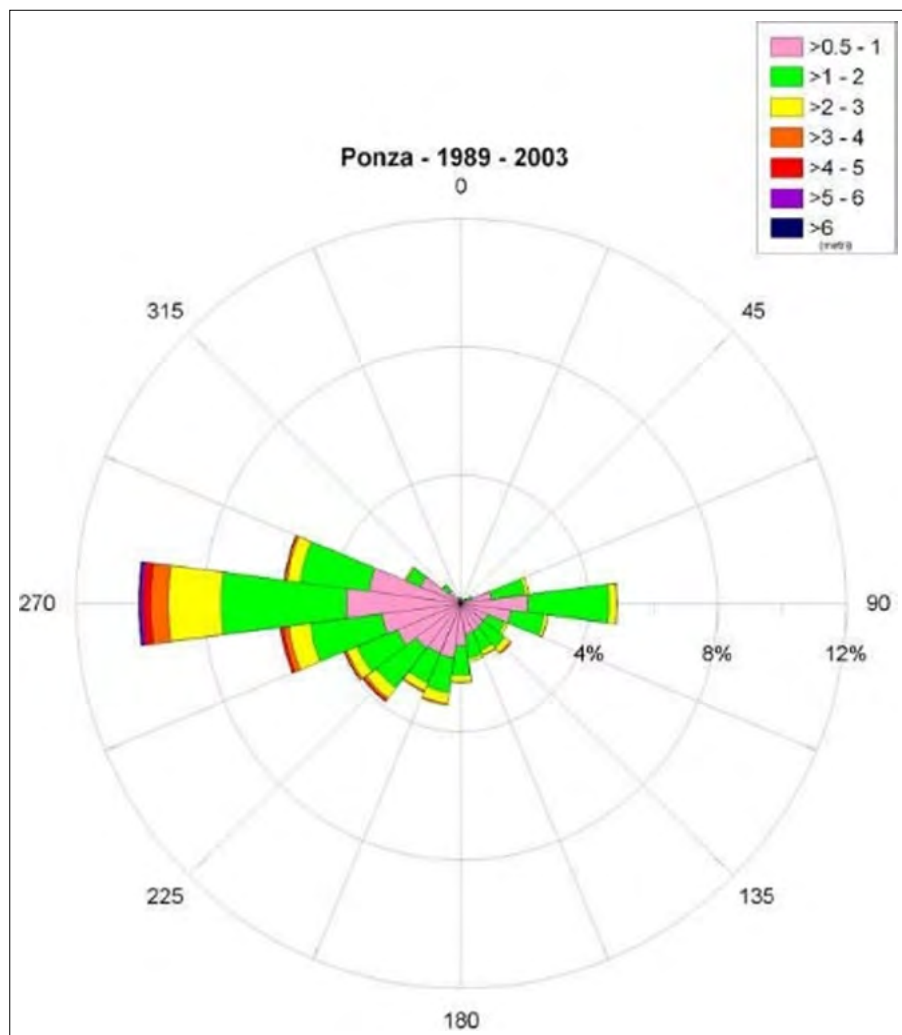


Figura 14. Distribuzioni congiunte di altezza significativa e direzione di provenienza delle onde a Ponza (da ISPRA - Servizio Difesa Coste)

Nelle depressioni interdunali e lungo le coste dei laghi costieri e dei sistemi palustri ad essi correlati sono presenti formazioni delle zone umide mediterranee che si distribuiscono in cinture legate al diverso grado di salinità e permanenza delle acque.

Sono presenti popolazioni di *Pancreaticum maritimum* e *Ammophila arenaria*, citati dalla Legge Regionale n° 61 del 19 settembre 1974: "Norme per la protezione della flora erbacea ed arbustiva spontanea", tra le piante di cui è vietata la raccolta, perché molto rare e in via di estinzione.

L'aggiornamento degli studi vegetazionali effettuati in area PNC evidenzia come l'avanduna, ovvero la porzione intermedia tra duna e spiaggia, sia sensibilmente compromessa nella sua struttura e nel suo grado di frammentazione, diversamente dalla porzione della duna consolidata (Lucchese & Pignatti 1990, Acosta et al. 1998a, Blasi et al. 1999, Acosta et al. 2000a, Blasi et al. 2002).

Dal punto di vista dello stato vegetazionale della duna, sebbene in questo progetto non siano stati acquisiti dati vegetazionali, qualitativamente si riscontra una totale mancanza delle fasce vegetazionali della duna mobile (si vedano le foto relative) e una modesta diffusione di specie vegetali aliene. In particolare, le morfologie del piede dunale mostrano una sostanziale "immobilità", legata al confinamento indotto dalle strutture rigide di protezione e contenimento del fronte dunale (vedi figura).

Lo stato di conservazione della vegetazione dunale risulta nel complesso molto critica lungo tutto il litorale del parco. Tutte le comunità erbacee annuali e perenni sono molto disturbate e non presentano quasi mai la zonazione tipica della vegetazione di spiaggia. In particolare, il Cakileto (Habitat 1210), formazione pioniera delle spiagge, è pressoché assente e la stessa specie caratteristica (*Cakile maritima*) è molto rara e spesso inserita all'interno delle comunità vegetali della duna consolidata. Le comunità perenni di pregio (Ammofiletto e Crucianello, rispettivamente Habitat 2120 e 2210) sono pressoché assenti. Nota di pregio è il rinvenimento di una popolazione consistente e fertile di *Malcolmia littorea* sulla duna presso Sabaudia. Questa specie è inserita nella Liste Rosse Nazionali nella categoria Endangered (EN).

Sulla duna alta, nelle depressioni protette dal vento, si instaurano comunità a dominanza di *Poaceae* annuali (Brachipodietti, sicuramente riferiti all'Habitat 2240 e, in alcuni aspetti, ai Malcolmietalia Habitat 2230). Anche queste comunità sono molto disturbate, spesso con ingressioni di specie delle dune mobili. Per quanto riguarda la macchia a ginepro (*Juniperus oxycedrus*, Habitat 2250) anche questa comunità risulta molto disturbata e compressa verso la sommità dunale dove la strada ne interrompe la continuità ecologica. Il versante a mare della duna è molto eroso e spesso i grandi individui di ginepro hanno le radici scoperte e sono in forte sofferenza. Le pinete (habitat 2270) e



Figura 15. Carta delle Serie di Vegetazione (Blasi C.)

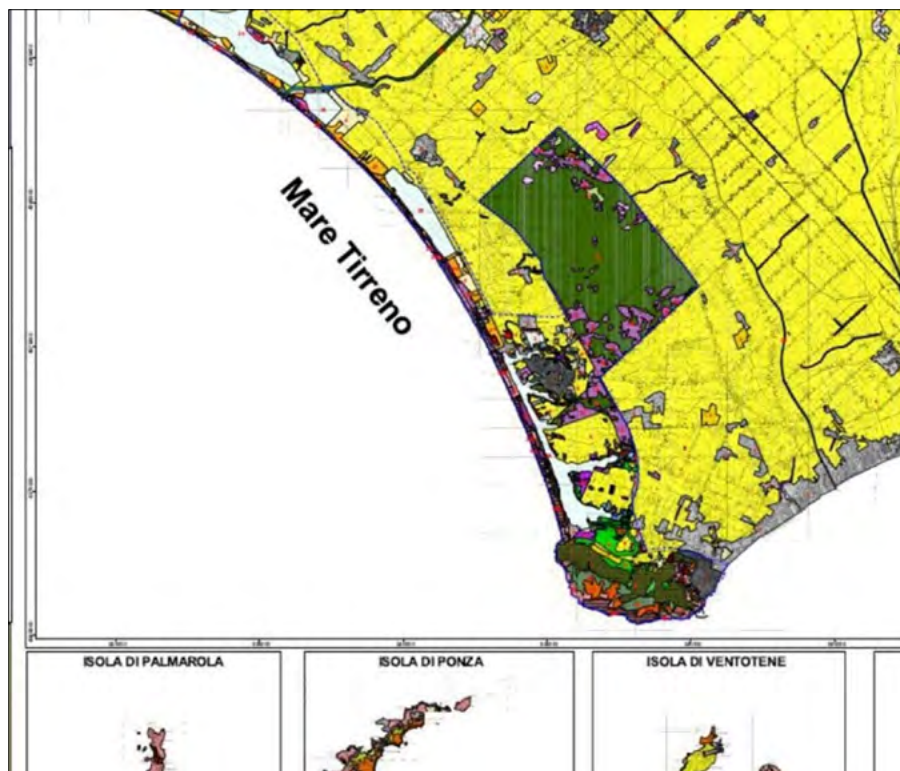


Figura 16. Carta delle fisionomie vegetali ed uso del suolo attuale 1:50.000 (Blasi C. et al.)

ancor più le frassinete e le alnete (habitat 91F0) del retroduna sono estremamente frammentate con un sottobosco povero e di tipo ruderale (*Rubus*, *Pteridium* e *Smilax*).

ASPETTI PROTEZIONISTICI

Il Parco Nazionale del Circeo fu istituito nel 1934 (L. 285/1934) “allo scopo di conservare, tutelare e valorizzare il

patrimonio naturalistico e per la promozione e lo sviluppo del turismo e delle attività compatibili”. Per gli stessi obiettivi conservazionistici, il sistema dunale del PNC è stato inserito nella rete europea “Natura 2000” e identificato ai sensi della direttiva comunitaria 92/43/CEE come Zone Speciali di Conservazione “Dune del Circeo” (IT6040018). Di simile rilevanza naturalistica si caratterizza la fascia retro-dunale, contraddistinta dalle zone umide connesse ai quattro laghi costieri di Fogliano, Monaci, Caprolace (IT6040012) e di Sabaudia (IT6040013), identificati come siti di interesse comunitario.

La ZSC IT6040018 “Dune del Circeo” (441 ha) è contenuta all’interno del Parco Nazionale del Circeo, ubicato lungo la costa tirrenica del Lazio meridionale, a circa 100 km a sud di Roma, nel tratto di litorale compreso tra Anzio e Terracina.

Grazie all’istituzione del Parco Nazionale del Circeo, avvenuta quando l’intera area pontina era sottoposta ai radicali interventi di prosciugamento ed appoderamento della Bonifica Integrale, venne evitato il totale disboscamento dell’antica “Selva di Terracina” di cui una piccola porzione risparmiata

SPECIE	NOME COMUNE	FAMIGLIA	TECNICA DI RIPRODUZIONE TESTATA	TECNICA RITENUTA COMMERCIALMENTE EFFICACE
<i>Agropyron junceum</i>	Gramigna delle spiagge	Graminaceae	separazione seme	*
<i>Ammophila littoralis</i>	Sparto pungente	Graminaceae	separazione seme	*
<i>Anthemis maritima</i>	Camomilla marina	Compositae	taleggio	*
<i>Cakile maritima</i>	Ravastrello marittimo	Cruciferae	separazione seme	*
<i>Calystegia soldanella</i>	Vilacchio marittimo	Campulacaceae	separazione seme	*
<i>Carpobrotus acinaciformis</i>	Fico degli Ottentoti	Aizoaceae	taleggio	*
<i>Crucianella maritima</i>	Crucianella marittima	Rubiaceae	separazione seme	*
<i>Cyperus hallei</i>	Zigolo delle spiagge	Cyperaceae	separazione seme	*
<i>Dorycnium hirsutum</i>	Trifoglio di mare	Leguminosae	separazione seme	*
<i>Echinophora spinosa</i>	Carota di mare	Umbelliferae	separazione seme	*
<i>Eryngium maritimum</i>	Calceareppola marina	Umbelliferae	separazione seme	*
<i>Glencium flavum</i>	Papavero cornuto	Papaveraceae	separazione seme	*
<i>Juncus acutus</i>	Giunco pungente	Juncaceae	separazione seme	*
<i>Lagurus ovatus</i>	Prunano	Graminaceae	separazione seme	*
<i>Matthiola sinuata</i>	Viola di mare	Cruciferae	separazione seme	*
<i>Medicago maritima</i>	Erba medica marina	Leguminosae	separazione seme	*
<i>Ononis variegata</i>	Ononide screziata	Leguminosae	separazione seme	*
<i>Oenothera maritima</i>	Sanzolonia delle spiagge	Compositae	separazione seme	*
<i>Pancratium maritimum</i>	Giglio di mare	Amaryllidaceae	separazione seme	*
<i>Plantago coronopus</i>	Piantaggine barbatella	Plantaginaceae	separazione seme	*
<i>Sporobolus pungens</i>	Gramigna delle spiagge	Graminaceae	separazione seme	*

Tavola 1. Specie adatte per la stabilizzazione dunale



Figura 17. Mappa del Parco (da Parks, 2022)

dal taglio costituì, insieme al Lago di Sabaudia, alla Duna Litoranea ed al Promontorio del Circeo, la prima configurazione territoriale del Parco. Con vari successivi provvedimenti, la base territoriale del Parco ha via via subito variazioni di tipo quantitativo e qualitativo, con l'istituzione di Riserve Naturali e riconoscimenti internazionali di valore ambientale.

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

Località: Caterattino.

Comune: Sabaudia (LA).

Coordinate geografiche: 33T 332955E 4574706N alt. 8m (zona1) – 33T

332949E 4574723N alt. 8,5m (zona 2) – 33T 332940E 4574752N alt. 9m (zona 3).

Esposizione: a Ovest-Sud-Ovest.

Altitudine: 8-9 m s.l.m.

Sviluppo longitudinale complessivo: 200 m.

Pendenza versante dunale: 20° (zona 3) e 25° (zona 1 e 2).

Pendenza spiaggia emersa/spiaggia sommersa: 2 - 3%.

Paesaggio: Regione Macroclimatica Mediterranea, Sistema dei depositi incoerenti, Sottosistema della spiaggia e della duna recente

Precipitazioni: scarse (831 mm).

Aridità estiva: intensa e prolungata (maggio- agosto).

Temperatura media (minima mensile del mese più freddo): 9,2 °C.

Classe fitoclimatica: 13, caratterizzata da un clima mesomediterraneo con periodi di forte aridità ed inverni miti.

Altezza significativa spettrale del moto ondoso: 0-4 m, eccezionalmente superiore a 6 m.

Direzione media di provenienza del moto ondoso: O (2000-2013).

Unità ambientale: Vegetazione della duna litoranea e degli altri depositi sabbiosi recenti e attuali (vedi figura).

Livelli di protezione:

a) Parco Nazionale del Circeo (Anno di istituzione 1934).

b) ZSC IT6040018 “Dune del Circeo” (vedi figura).

Ente Gestore:

a) Ente Parco Nazionale del Circeo.

Tratto di costa interessato: l'azione complessiva interessa circa 200 m di duna costiera, nel tratto subito a nord-ovest della foce del Diversivo Nocchia.

Superficie di duna interessata: alcune tipologie di intervento, di carattere lineare al piede delle dune (barriere basali permeabili), riguardano l'intero segmento costiero (200 ml); altre, di carattere puntuale lungo i canali di erosione dunale (schermature frangivento), si sviluppano per alcune decine di metri (460 mq).

Gli interventi attivi di contrasto all'erosione costiera che è possibile attuare nel contesto in esame, anche a prescindere da eventuali ulteriori azioni che possono essere effettuate a mare qualora ritenute necessarie (es. ripascimenti protetti, barriere immerse o soffolte, ecc.), devono essere inquadrati come interventi di protezione del piede della duna e di ripristino morfologico del cordone dunale, mediante tecniche di ingegneria naturalistica a bassissimo impatto ambientale.

In particolare, sulla stregua di quanto già recentemente sperimentato in contesti simili su arenili della Toscana e del Lazio, si prevedono interventi stabilizzanti con resistenza antierosiva ma che, al tempo stesso, si integrino con l'ambiente e il paesaggio. Tecniche denominate “barriere frangiflutti emerse”, comprendenti “palificate antedunali”, “steccati basali antedunali”, “palizzate antedunali”.

Tecniche denominate “schermature frangivento” comprendenti “stuoie di canne” e pali in legname, “biostuoie” in cocco o agave e pali in legname, “ramaglia” in fascine con e senza pali in legname, utilizzando materiale vegetale da operazioni di taglio forestale (eventualmente anche di specie aliene



Figura 18. Ortofoto del sito (da F.Boccalaro, 2020)

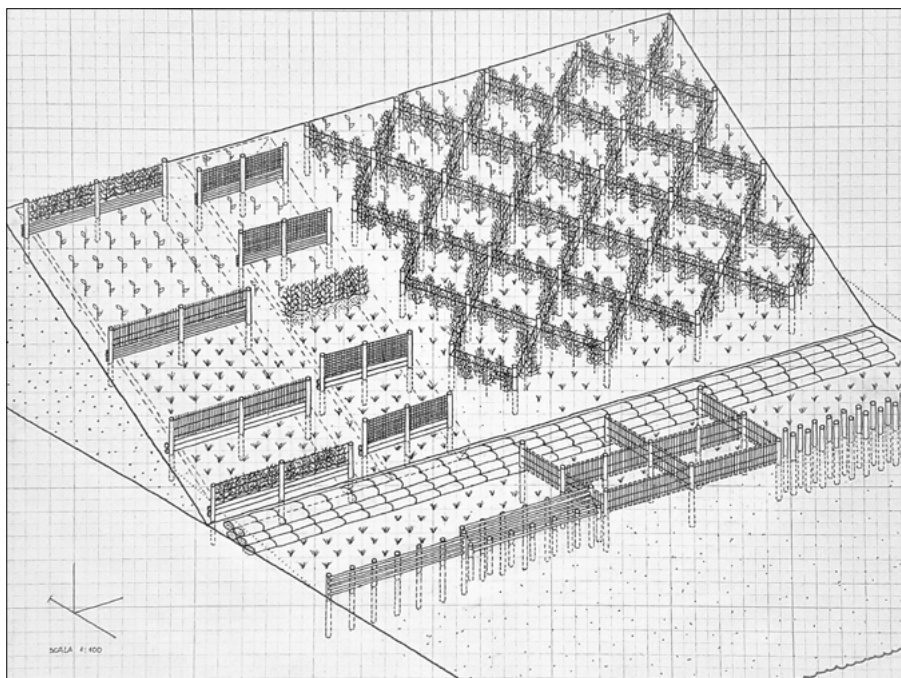


Figura 19. Assonometria del progetto (da F.Boccalaro, 2020)

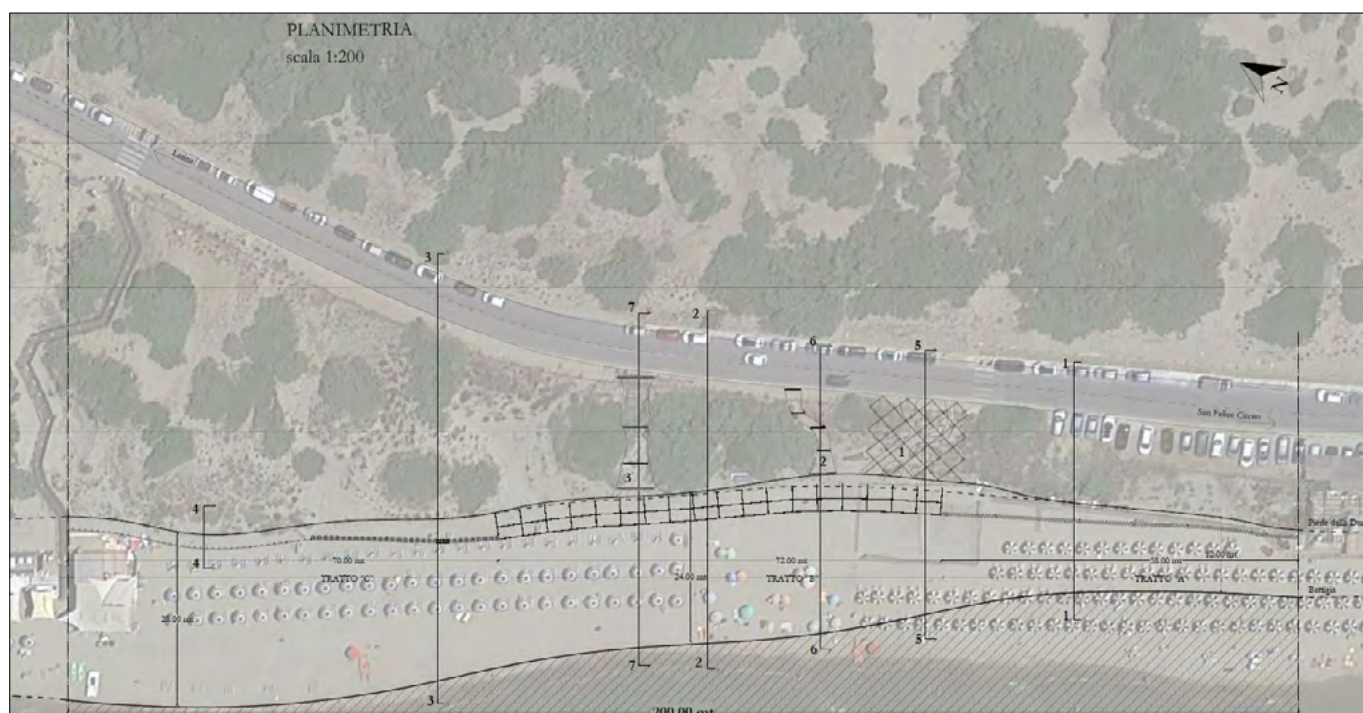


Figura 20. Planimetria del progetto (da F.Marsiali, 2020)

invasive), anche sotto forma di cippato. Gli apporti di sabbia, anche contenuti in sacchi di fibra vegetale, possono essere mescolati con residui di posidonia spiaggiata eventualmente disponibile. Le dune saranno salvaguardate attraverso la realizzazione di strutture atte a impedire il passaggio dei bagnanti sulle dune (recinzioni).

Per ripristinare la naturale mobilità della duna, innescare il processo di ricolonizzazione delle specie caratteristiche dell'habitat e limitare il ruscellamento dell'acqua piovana, saranno rimosse vetuste opere di sistemazione dunale (pallificate, steccati, sacchi) per alcuni tratti costieri ed utilizzate moderne tecniche di ingegneria naturalistica.

Le dune, nelle porzioni più basse, saranno consolidate con la messa a dimora di specie erbacee come *Ammophila littoralis*, *Agropyron junceum*, ecc.; nelle porzioni più elevate con la messa a dimora di specie arbustive (*Juniperus oxycedrus* s. *Macrocarpa*, *Phyllirea angustifolia*, *Pistacia lentiscus*, ecc.).

Per l'approvvigionamento di *Ammophila* e *Agropyron* si sceglie di utilizzare solo individui autoctoni, per preservarne le caratteristiche genetiche ed ecologiche, prelevandoli da siti di "diradamento naturale" locali, individuati con estrema attenzione in modo da non recar danno ad aree in stato di degrado e comportare il minore impatto sull'ambiente (ad es., si agisce solo sui cespi più densi).

Le autorizzazioni al prelievo saranno concesse dai vari uffici preposti, con precise prescrizioni, mentre le specie arbustive impiantate saranno fornite



Figura 21. Planimetria del progetto (da F.Marsiali, 2020)

dal vivaio forestale del Parco Nazionale del Circeo, vista la valenza naturalistica dell'Area protetta e la necessità di tutelare il patrimonio vegetale locale anche sotto il profilo genetico.

CONCLUSIONI

L'intervento proposto, ben si configura negli orientamenti indicati nello Studio di Fattibilità Dune – prodotto nell'ambito della redazione dei PDG della ZPS IT6040015 "Parco Nazionale del Circeo" e dei SIC inclusi e richiamato nella misura di conservazione di cui sopra – disposizioni dirette verso il

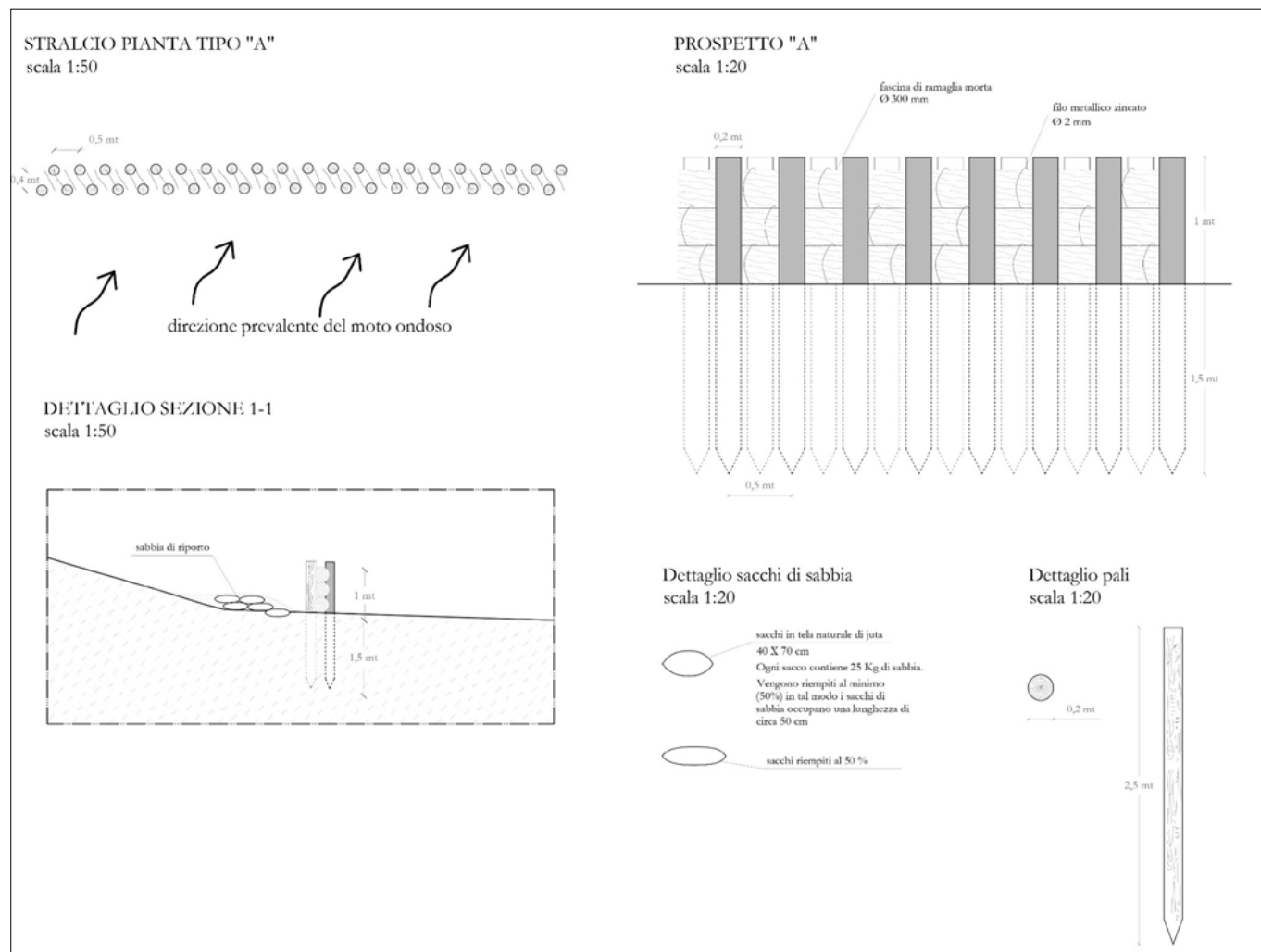


Figura 22. Palificate antedunali (da F.Marsiali, 2020)



Figura 23. Paratie in pali (da Scottish Natural Heritage, 2004)

ripristino dello stato naturale, mediante la difesa del sistema dunale dalle azioni di natura meteomarina e antropica che ne provocano il degrado (realizzabili attraverso la stabilizzazione del piede e del fronte duna e ripristino della continuità del cordone dunale).

Pertanto l'intervento, di fatto, risulta connesso al mantenimento dello stato di conservazione degli habitat e specie presenti.

Inoltre la modalità di realizzazione non prevede incidenze negative sugli habitat e sulle specie di interesse comunitario di cui alle direttive CEE 92/43

STRALCIO PIANTA TIPO "C2"
scala 1:50



PROSPETTO TIPO "C2"
scala 1:20

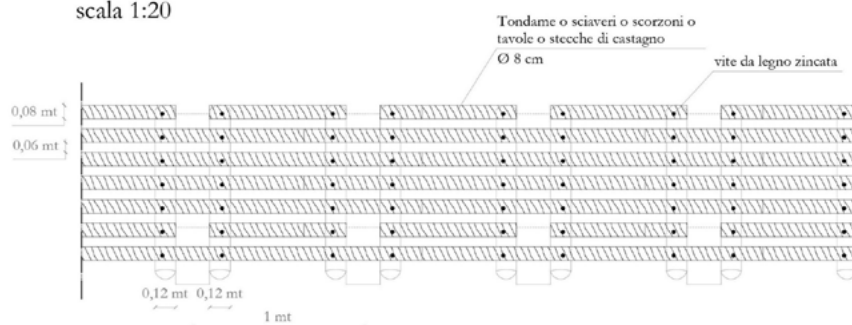


Figura 24. Steccati basali antedunali (da F.Marsiali, 2020)

DETTAGLIO SEZIONE 3-3
scala 1:50

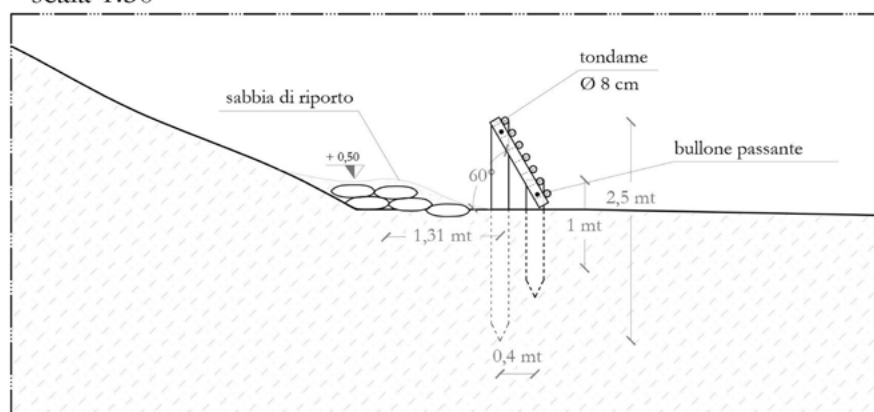


Figura 25. Steccati basali antedunali (da F.Marsiali, 2020)



Figura 26. Steccati per dune stagionali a Texel (NL) (da DEFRA, 1999)

e 79/409 trattandosi, invero, di un intervento a basso impatto e comportante semplici tecniche di ingegneria naturalistica in aree attualmente prive di vegetazione a causa appunto dei fenomeni erosivi instauratisi, senza prevedere l'utilizzo sulla duna di mezzi meccanici e da realizzarsi in tempi ristretti (15-20 gg).

L'aspetto sperimentale dell'intervento consiste nel verificare quale delle tipologie di soluzione sia più consona sia per i risultati che per i costi e quindi eventualmente esportabile per altri tratti del sistema dunale del Parco in cui sono presenti simili fenomeni erosivi.

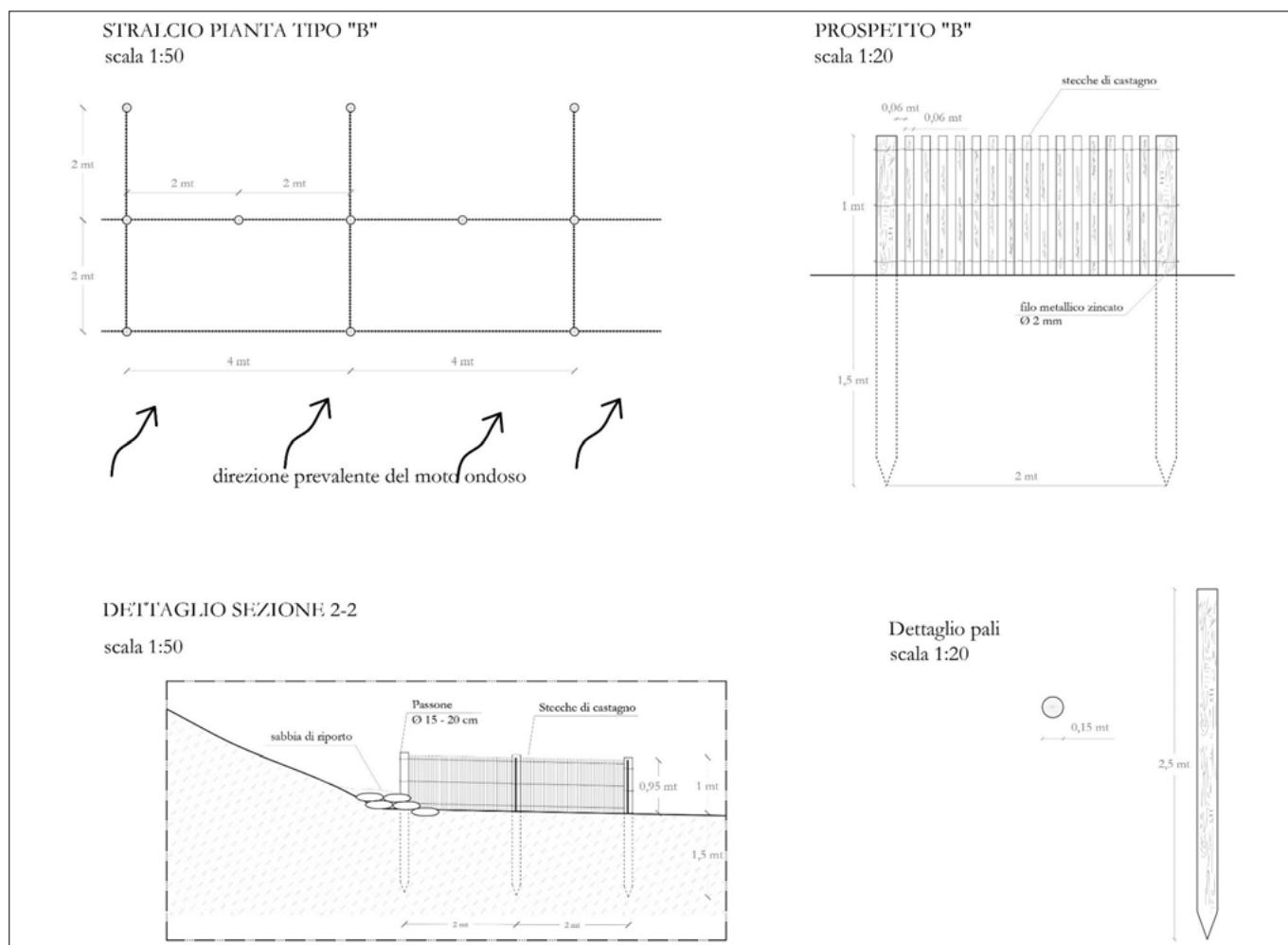


Figura 27. Palizzate in stecche/tondame di castagno (da F.Marsiali, 2020)

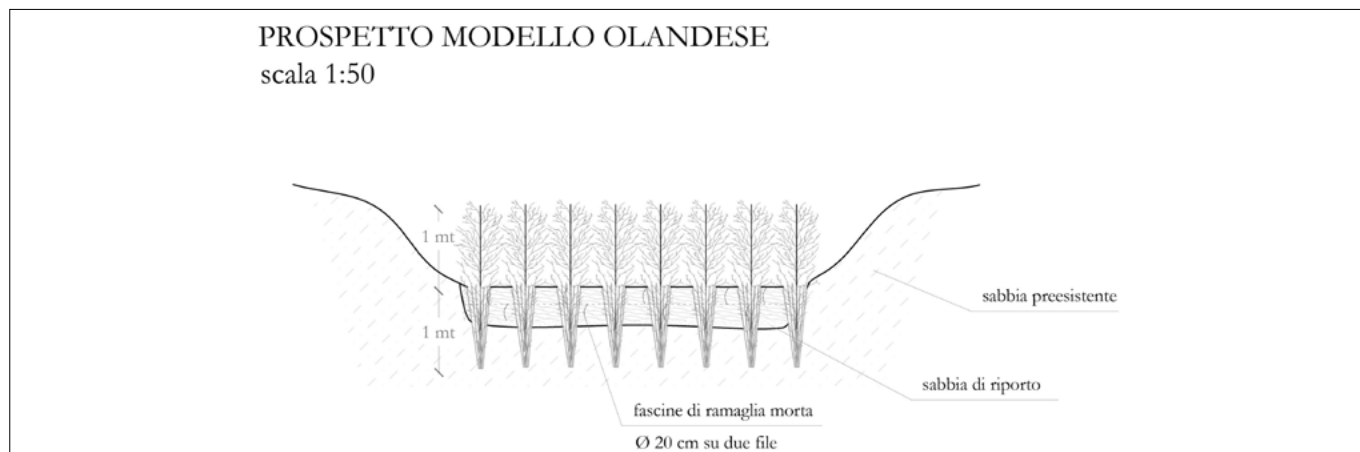


Figura 28. Protezione di dune a Cala Lagor in Algarve (...)



Figura 29. Schermatura «olandese» (da F.Marsiali, 2020)



Figura 30. Intervento di stabilizzazione di dune costiere con griglie di siepi morte (Olanda) (da DEFRA, 1999)

PROSPETTO CANALE 2 scala 1:50

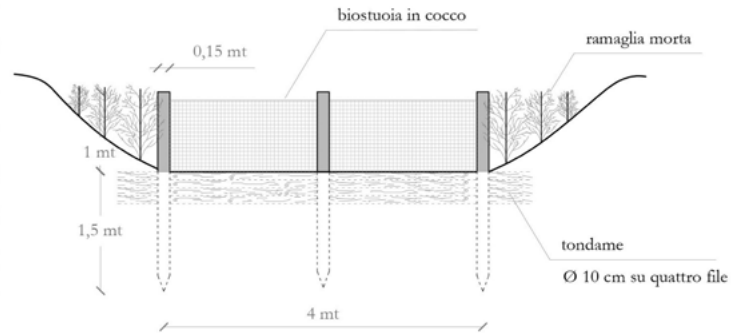


Figura 31. Schermatura con biorete in cocco (da F.Marsiali, 2020)



Figura 32. Biorete in cocco (da F. Boccalaro, 2010)

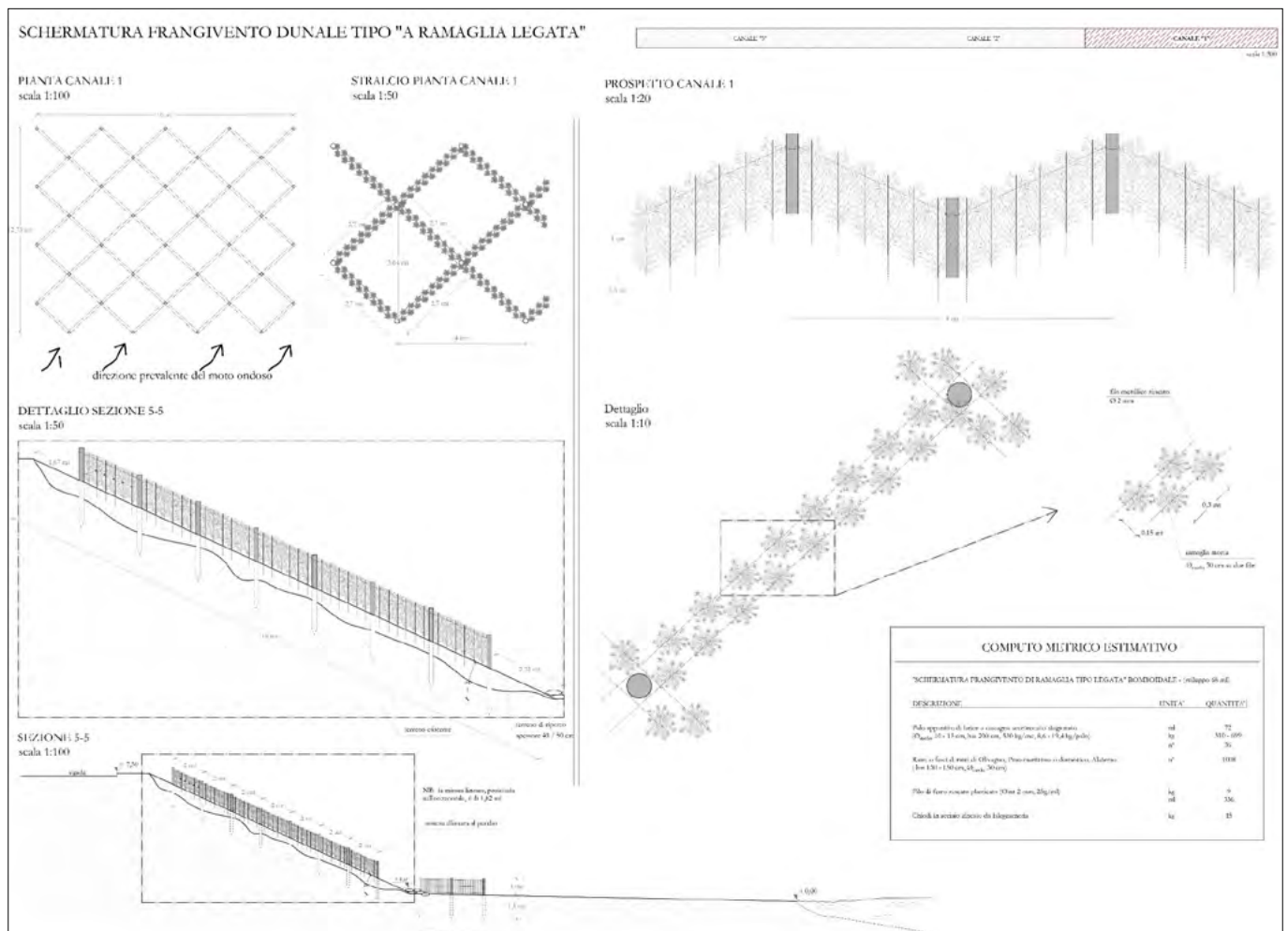
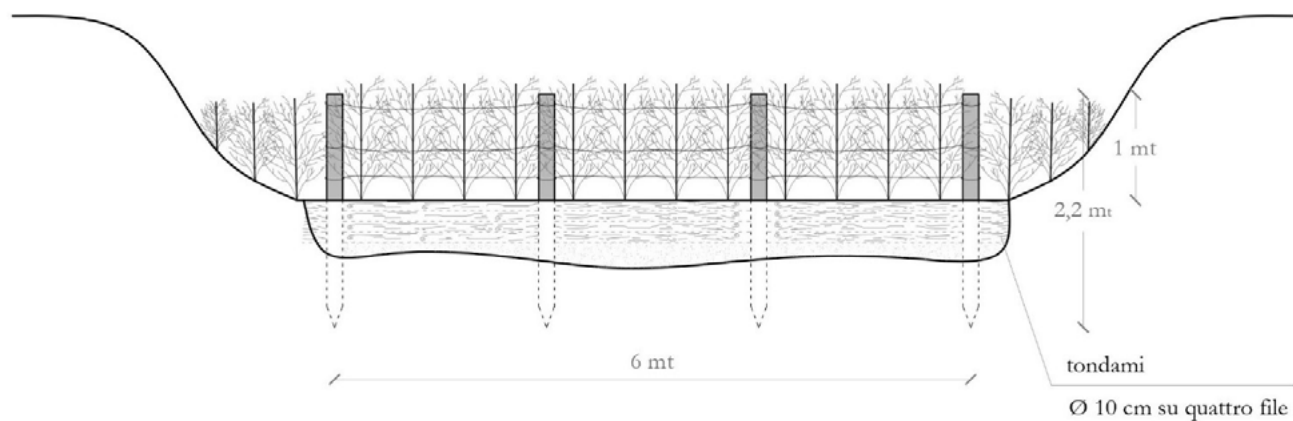


Figura 33. Schermature romboidali (da F.Marsiali, 2020)

PROSPETTO CANALE 3 - tipo a)

scala 1:50



PROSPETTO CANALE 3 - tipo b)

scala 1:50

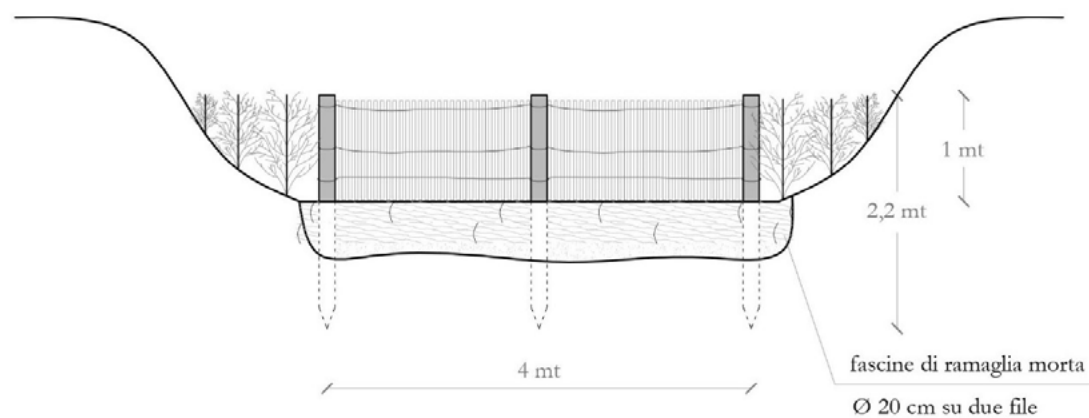


Figura 35. Schermature in ramaglia e canne (da F.Marsiali, 2020)



Figura 36. Recinzioni e cartellonistica a Maiorca (da F.Boccalaro, 2010)



Figura 34. Schermature al Circeo (da F.Boccalaro, 2016)

LISTA DELLE SPECIE VEGETALI DA IMPIEGARE

Fascia della avanduna (duna embrionale – Agropireto)

(96 mq, 3 fasci/mq, ~ 288 fasci totali, 2+6 piantine ogni fascio)

	n° fasci	trapianto	h (cm)	ϕ (cm)	riproduzione
Finocchio litorale (<i>Echinophora spinosa</i>)	32	plantule	15	4	seme
Giglio di mare (<i>Pancratium maritimum</i> , protetta) [sottovento]	32	rizomi, cespi	15	4	seme
Gramigna delle spiagge (<i>Elymus Farctus</i>) (***)	64	rizomi, cespi	35	8	separazione, seme
Ononide screziata (<i>Ononis variegata</i>) [sottovento] (**)	32	rizomi, cespi	15	4	seme, separazione
Ravastrello (<i>Cakile maritima</i>)	32	plantule	15	4	seme
Sparto della sabbia (<i>Ammophila arenaria</i>) (**)	32	rizomi, cespi	35	8	separazione, seme
Sporobolo delle spiagge (<i>Sporobolus virginicus</i>) (**)	32	rizomi, cespi	15	4	separazione, seme
Vilucchio marittimo (<i>Calystegia soldanella</i>)	32	plantule	15	4	seme

N.B.: le piante con (*) sono quelle di maggiore importanza

Figura 40. Specie vegetali da impiegare (da F.Marsiali, 2020)

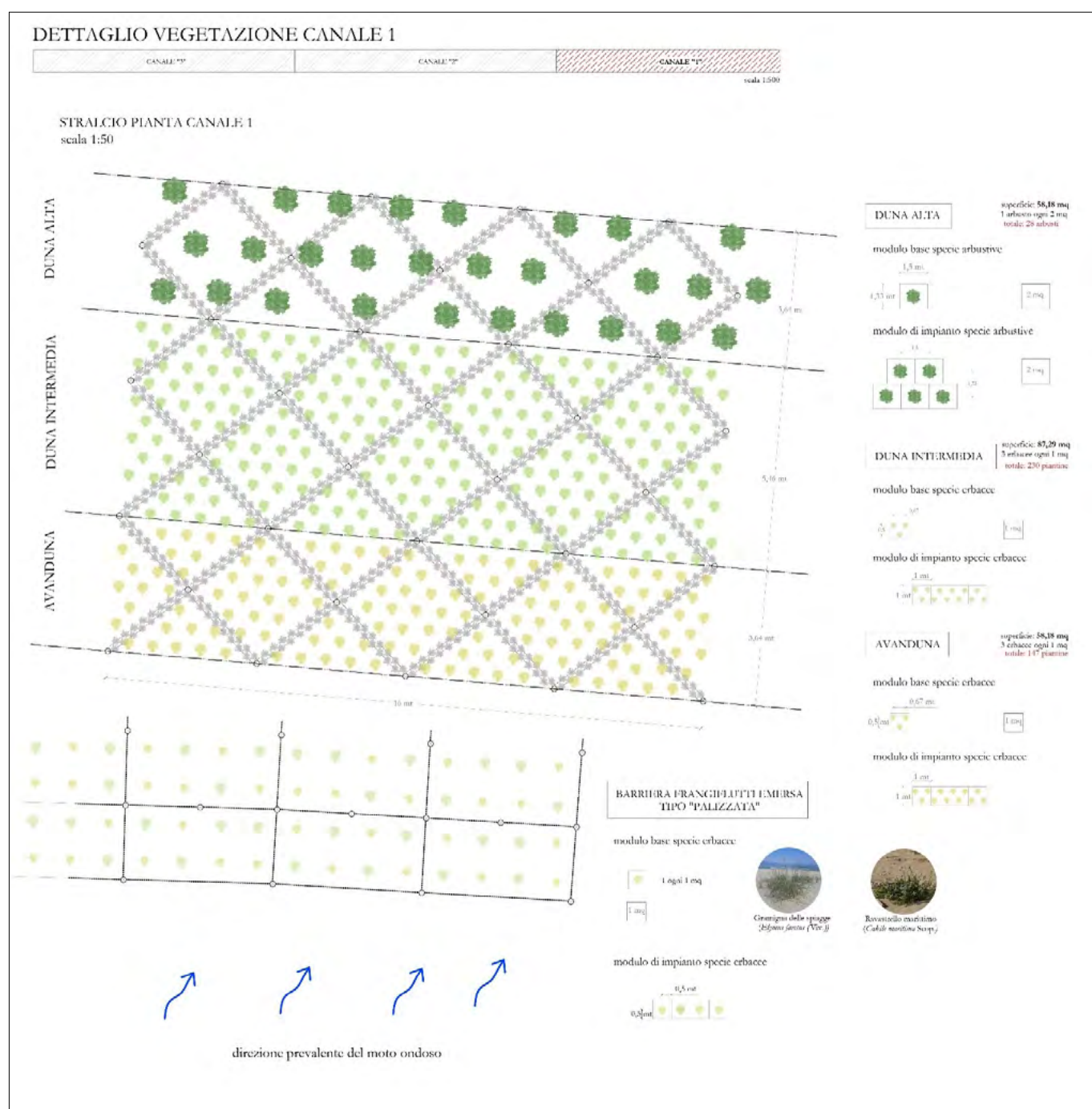


Figura 41. Disposizione delle specie vegetali (da F.Marsiali, 2020)

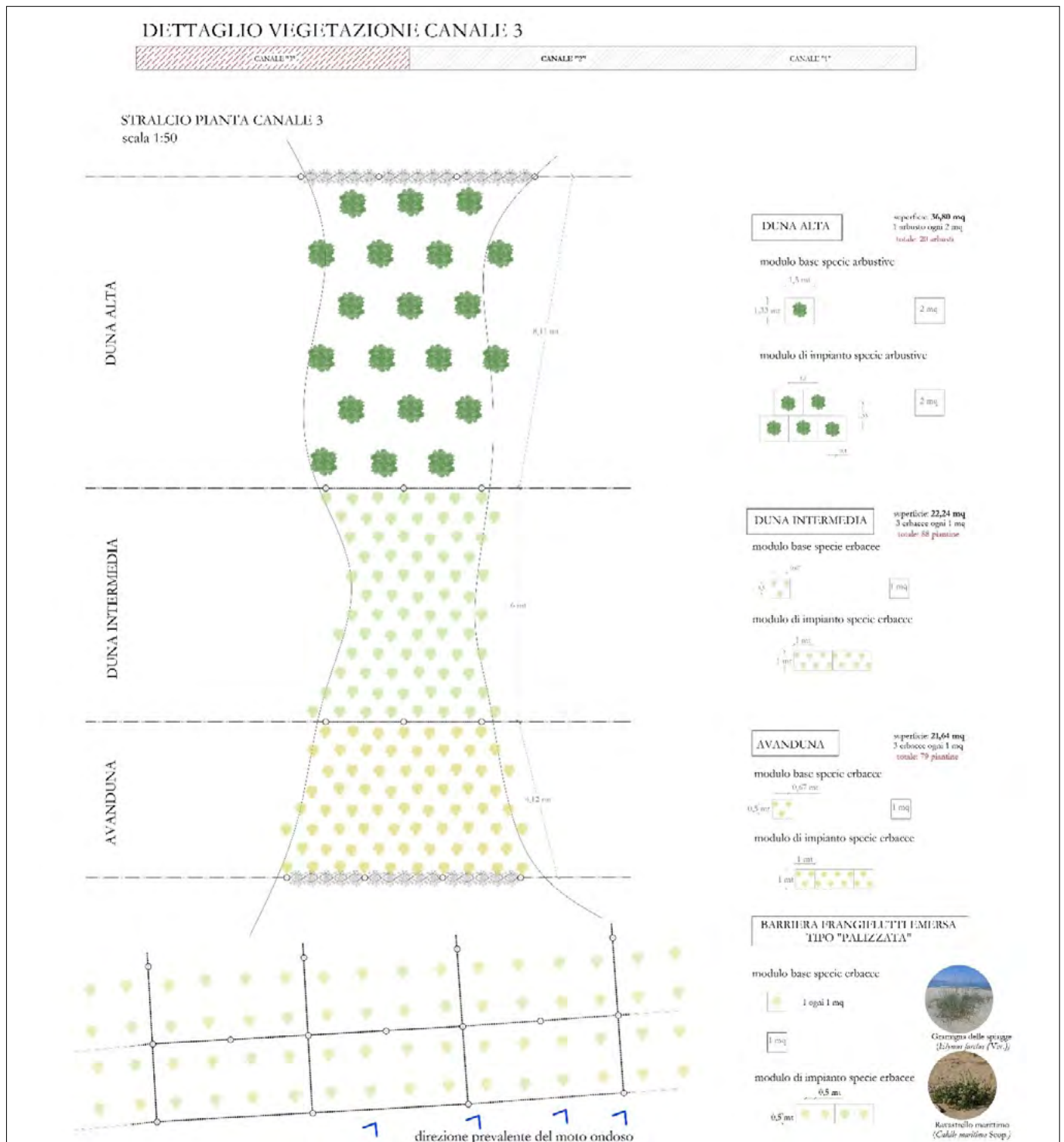
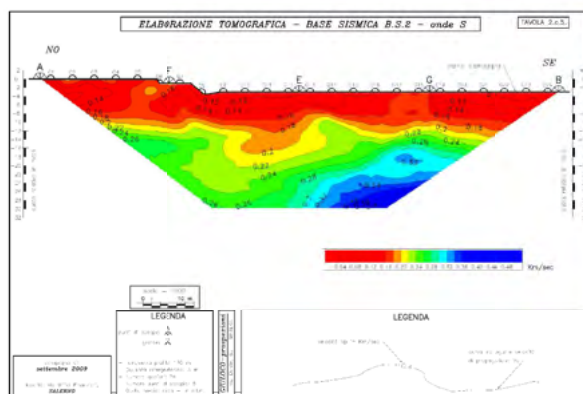
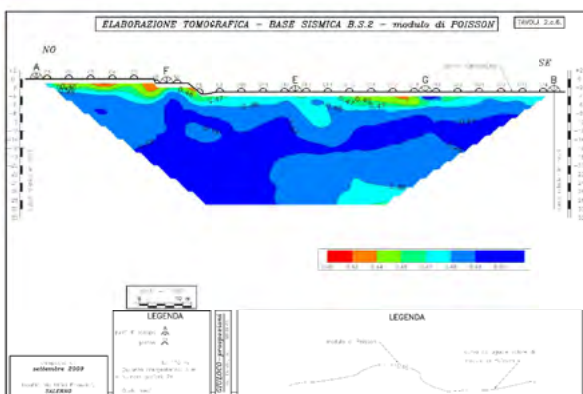


Figura 42. Disposizione delle specie vegetali (da F.Marsiali, 2020)



Figura 43. Piantumazione di *Ammophila arenaria* sulle dune di Cala Mesquida, Maiorca (da F. Boccalaro, 2010)



GIULOCO-prospezioni s.a.s. del Dott. Geol. Giuseppe Locorotolo

[iscritta al Registro delle Imprese di Matera R.E.A. n. 84248] P. IVA IT 01249760776

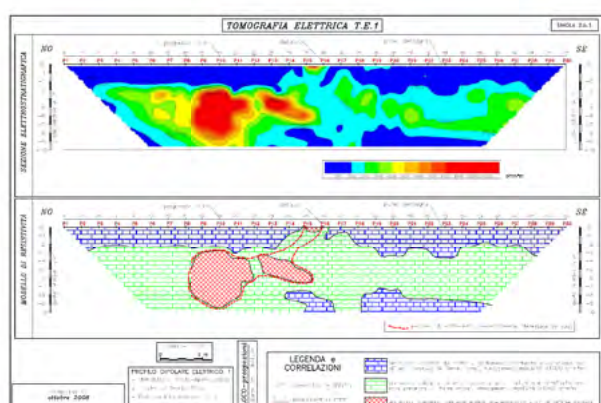
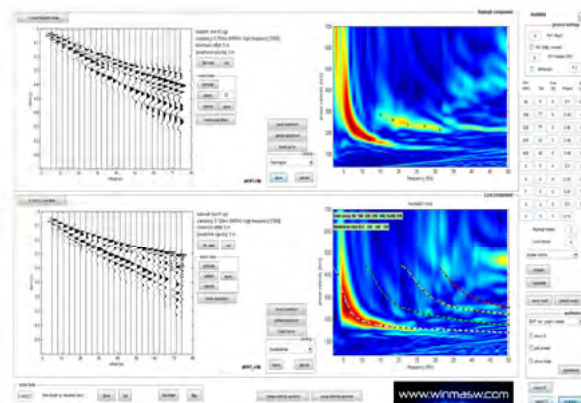
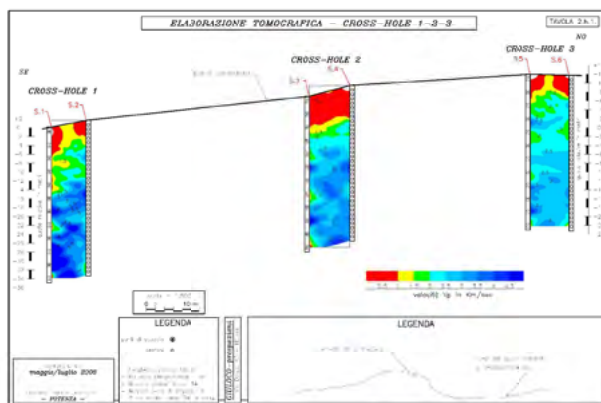
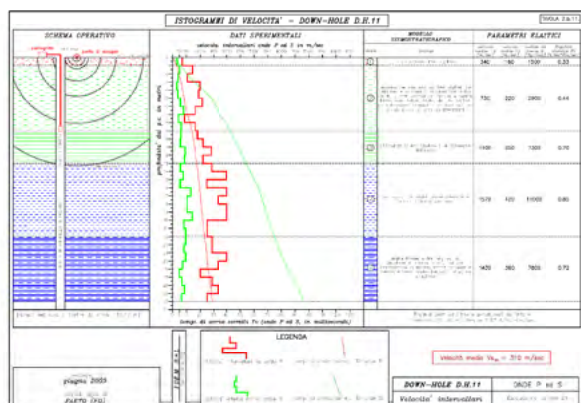
Sede: via De Sarnis, 14 75100 Matera Tel. & Fax 0835.264522 Cell. 335.6204363

Indirizzo e-mail: glocorotolo@gmail.com indirizzo WEB: <http://home.teletu.it/giuloco>

La GIULOCO-prospezioni opera nel settore delle indagini geognostiche con specializzazione nel campo della Geofisica Applicata da oltre 25 anni. Esegue interventi di supporto per studi geologico-tecnici inerenti tematiche ambientali, ingegneristiche, idrogeologiche finalizzate alla ricostruzione di sequenze stratigrafiche, individuazione di corpi sepolti, caratterizzazione geodinamica dei litotipi, individuazione di livelli acquiferi.

Operando in diverse regioni viene a contatto con contesti geologici differenti, accrescendo continuamente la propria esperienza applicativa potendo fornire così valide indicazioni geognostiche su un'ampia gamma di terreni. Le metodologie geofisiche applicate sono quelle della geosismica e della geoelettrica, con le seguenti tipologie d'indagine:

- Prospezione geosismica a rifrazione di superficie in onde P e S, con calcolo dei moduli dinamici e V_{seq} - V_{s30} e con elaborazione tomografica delle sezioni sismostratigrafiche (BASE SISMICA); software utilizzati IXRefraX v. 1.25 della Interpex Limited e Rayfract v. 4.02 della Intelligent Resources Inc.;
- Prospezione geosismica in foro in onde P e S, con calcolo dei moduli dinamici e V_{s30} (DOWN-HOLE e CROSS-HOLE), sia con tiri diretti che con elaborazione tomografica; software utilizzato IXRefraX v. 1.25 della Interpex Limited e Rayfract v. 4.02 della Intelligent Resources Inc.;
- Prospezione geosismica di superficie attiva in onde di Rayleigh, sia in componente verticale che radiale, e in onde di Love, con analisi congiunta, con calcolo di V_{seq} - V_{s30} (MASW); software utilizzato winMASW Academy 2018 della ElisoSoft;
- Prospezione geosismica di superficie passiva, con metodologia REMI, ESAC e HVSr, anche in analisi congiunta con acquisizioni tipo MASW; software utilizzato winMASW Academy 2018 della ElisoSoft;
- Prospezione geoelettrica di resistività con metodologia Schlumberger o Wenner (SONDAGGIO ELETTRICO VERTICALE); - prospezione geoelettrica di resistività e di caricabilità (polarizzazione indotta) 2D e 3D con metodologia Dipolo-Dipolo Assiale, Schlumberger, Wenner, Wenner-Schlumberger, Polo-Polo, Polo-Dipolo con elaborazione tomografica (PROFILO DI RESISTIVITÀ); software utilizzato EarthImager 2D/3D della AGI;
- Prospezione georadar GPR; eseguita con sistema radar Ris MF Hi-Mod I prodotto dalla I.D.S. - Ingegneria dei Sistemi S.p.A., con software di elaborazione GRED 3D;



Proposte per la mitigazione del rischio geo-idrologico nella città di Ceva (CN)

Proposals for the mitigation of geo-hydrological risk in the city of Ceva (CN)

Annalisa Bove

Geologo, Libero Professionista, Presidente della Sezione Piemonte-VdA SIGEA-APS
E-mail: annalisa.bove@geologiapiemonte.it

Luciano Masciocco

Università degli Studi di Torino, Consigliere SIGEA-APS
E-mail: luciano.masciocco@unito.it

Parole chiave: pericolosità geo-idrologica, rischio geo-idrologico, città di Ceva
Key words: geo-hydrological hazard, geo-hydrological risk, city of Ceva

INTRODUZIONE

Il lavoro prende in considerazione la mitigazione del rischio geo-idrologico nella città di Ceva (CN), colpita dagli eventi alluvionali del 1994, del 2016 (Fig. 1) e del 2020.

La città sorge alla confluenza del T. Cevetta nel F. Tanaro e, durante gli eventi meteorici, riceve le acque dai due bacini idrografici estesi rispettivamente 73,5 km² e 392,5 km² (Fig. 2).

Il presente studio completa due precedenti lavori: nel primo (Bonasera *et al.*, 2020) si era valutata la pericolosità idrologica della città di Ceva, risultata molto elevata, con superamenti della portata ammissibile delle sezioni idrauliche prese in esame anche per tempi di ritorno di 20 anni.

Si rimanda a questo lavoro per quel che riguarda gli inquadramenti territoriali. Nel secondo (Bonasera *et al.*, 2022), si indicavano due siti ideali per la realizzazione di sbarramenti utili alla laminazione delle piene, ubicati nel tratto di bacino a monte di Ormea: l'uno sul T. Negrone (Fig. 3), l'altro sul T. Tanarello (Fig. 4).

I due sbarramenti erano stati ipotizzati per gestire al meglio volumi di piena con tempo di ritorno pari a 200 anni.

Le configurazioni ottimali comportano un'altezza di 63 m per lo sbarramento sul T. Negrone, e un'altezza di 34 m per quello sul T. Tanarello con volumi di massimo invaso rispettivamente di 4.558.630.m³ e di 3.382.060.m³.

La costruzione di tali sbarramenti darebbe ottimi effetti di mitigazione ai centri abitati dell'Alta Val Tanaro (Ormea e Garessio) ma effetti limitati per la città di Ceva (Tab. 1).

Da qui la necessità di proporre, oltre ai due siti individuati, ulteriori aree da destinare a vasche di laminazione nel settore di bacino del F. Tanaro a valle di Ormea utili ad aumentare la percentuale di mitigazione del rischio di inondazione nel capoluogo Cebano, comprenden-



Figura 1. Evento alluvionale del 21-25 novembre 2016: il Tanaro esonda, allagando l'intero quartiere ove sorge la scuola materna, riconoscibile dal tetto blu (Foto Dott. Giuseppe Galliano)

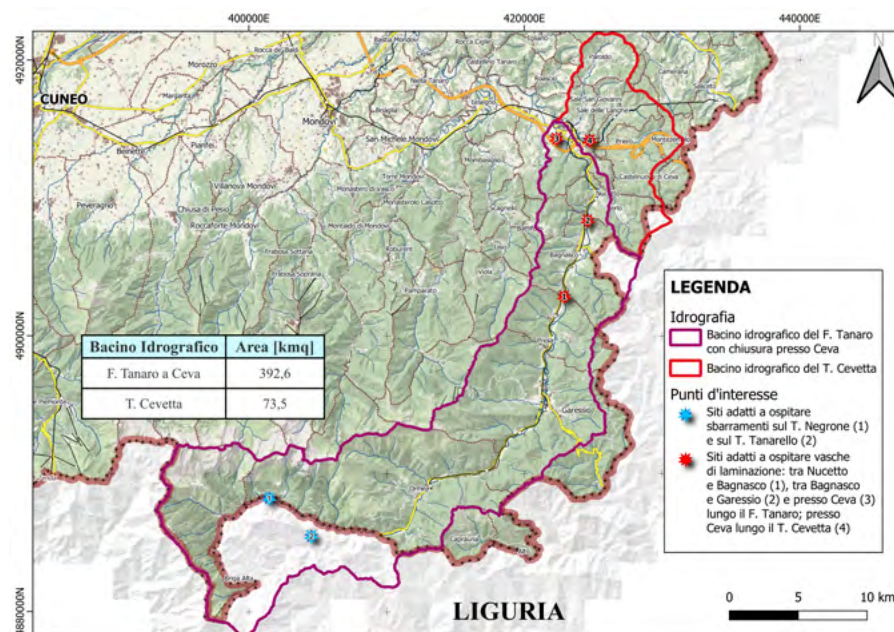


Figura 2. La città di Ceva sorge alla confluenza del T. Cevetta nel F. Tanaro e, durante gli eventi meteorici, riceve le acque dai due bacini idrografici estesi rispettivamente 73,5 km² e 392,5 km²

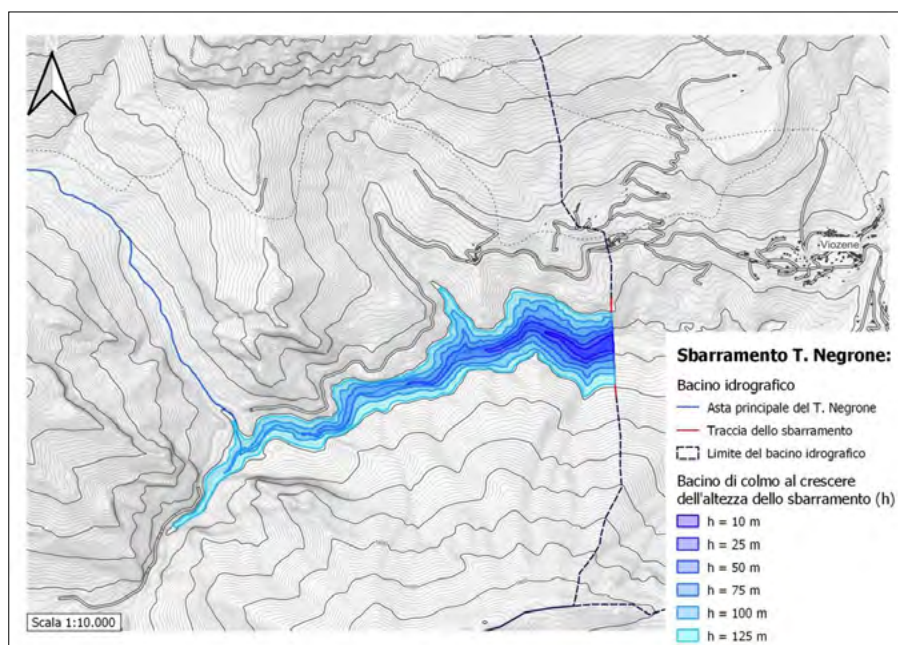


Figura 3. Ubicazione dello sbarramento ipotizzato sul T. Negrone ed estensione del bacino al colmo in funzione dell'altezza dello sbarramento (Bonasera et al., 2022)

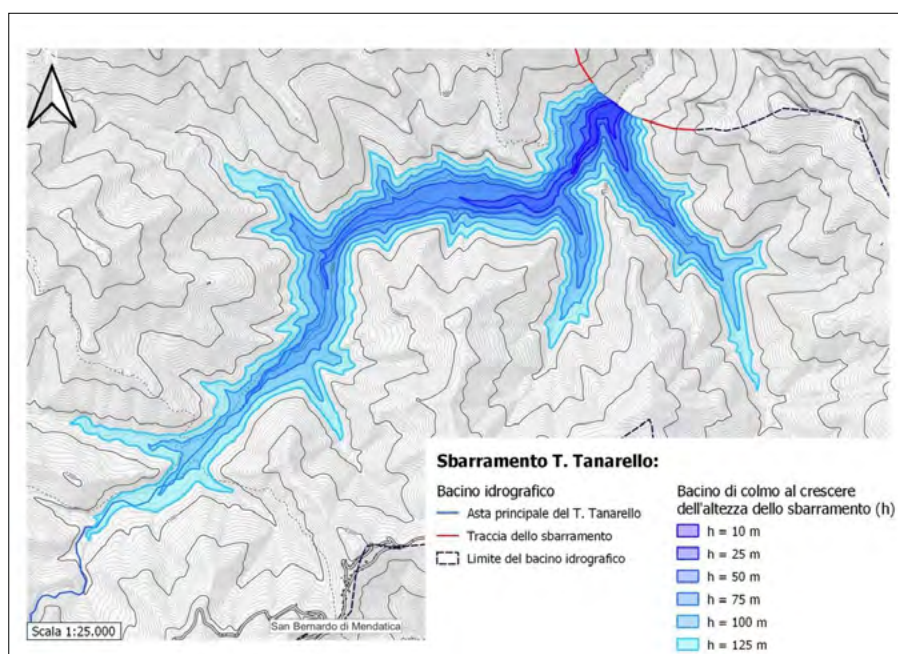


Figura 4. Ubicazione dello sbarramento ipotizzato sul T. Tanarello ed estensione del bacino al colmo in funzione dell'altezza dello sbarramento (Bonasera et al., 2022)

Tabella 1. Effetto di mitigazione delle portate di massima piena considerando la configurazione ottimale dei due sbarramenti: H = 63 m sul T. Negrone e H = 34 m sul T. Tanarello (Bonasera et al., 2022)

Sezione	Tr anni	Q_{max} senza sbarramenti	Q_{max} con sbarramenti	Mitigazione %
		m ³ /s	m ³ /s	
Ormea	200	813	458	44
Garessio	200	1020	709	30
Bagnasco	200	1117	858	23
Nucetto	200	1110	869	22
Ceva	200	1093	870	20

do nella ricerca anche il sottobacino del T. Cevetta.

MODALITÀ DI INDAGINE

L'indagine è stata svolta esclusivamente dal punto di vista morfologico impiegando il DTM regionale con passo a 5 m e tenendo conto della presenza di infrastrutture (strade e zone edificate). Inoltre, in due casi su quattro, si è ipotizzato, oltre allo sbarramento, anche la realizzazione di una sponda per contenere volumi maggiori nel bacino retrostante durante le piene eccezionali. I risultati dell'indagine sono quindi espressi solo in volumi stoccati al colmo delle strutture ipotizzate, che però si possono confrontare con le capacità dei due serbatoi supposti sui Torrenti Negrone (4,5 M.m³) e Tanarello (3,4 M.m³) per avere un'idea dell'impatto che possono avere sulla mitigazione del rischio di inondazione della Città di Ceva. Nelle cartografie vengono inoltre segnalate anche le aree in frana presenti in zona, ricavate dall'inventario dei fenomeni franosi d'Italia (Rif. WEB n. 1).

ULTERIORI PROPOSTE DI INTERVENTO SUL FIUME TANARO

In prossimità del corso del F. Tanaro, nel tratto di fondovalle compreso tra Ormea e Ceva, alcuni tratti sono connotati da superficie non urbanizzata ampia o anche molto ampia, per cui appaiono ben predisposti ad ospitare opere di mitigazione delle piene del fiume stesso.

Queste aree sono, in altre parole, degli ottimi siti in cui prevedere interventi di realizzazione di opere di mitigazione, le quali però dovrebbero prevedere alcune facili modifiche della topografia locale al fine di ottimizzare il volume di piena contenibile. Infatti nel fondovalle esiste un rilevato ove si colloca la linea ferroviaria, ormai in disuso: quest'opera già presente potrebbe fungere da punto di partenza o di appoggio per la realizzazione delle opere di mitigazione qui considerate.

Tra l'altro, i lavori sarebbero molto agevolati dall'estrema accessibilità ai cantieri e alla facile manovrabilità delle macchine per la movimentazione terra, rispetto ai siti individuati sul T. Negrone e sul T. Tanarello, con un notevole risparmio sui costi di realizzazione.

TRATTO TRA ORMEA E GARESSIO

La posizione di fondovalle compreso tra l'abitato di Ormea e quello di Garessio mostra tratti abbastanza ampi e poco

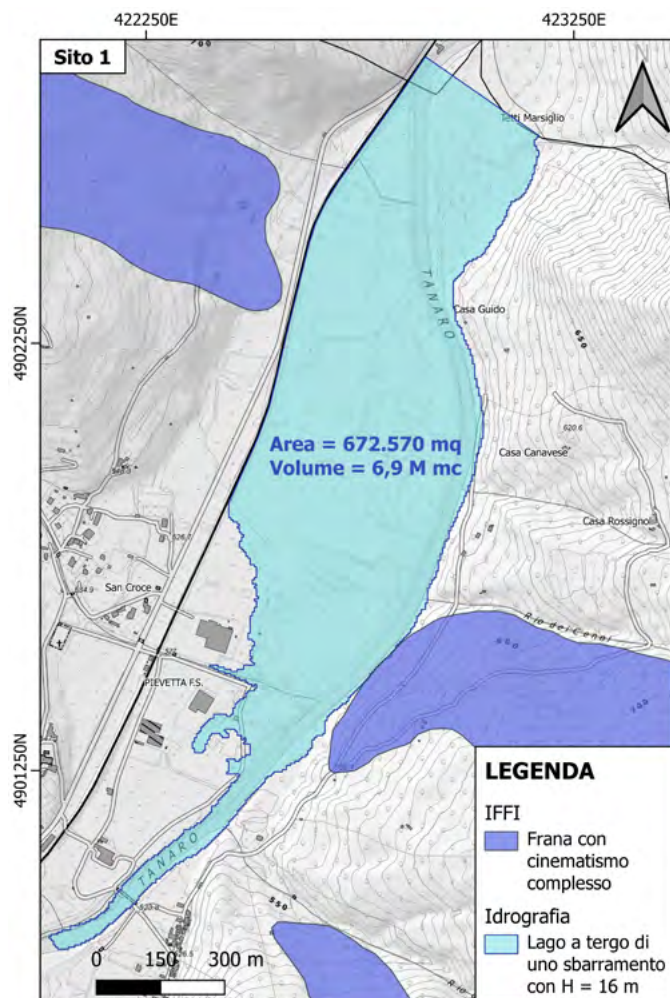


Figura 5. Ubicazione dello sbarramento ipotizzato tra Priola e Bagnasco

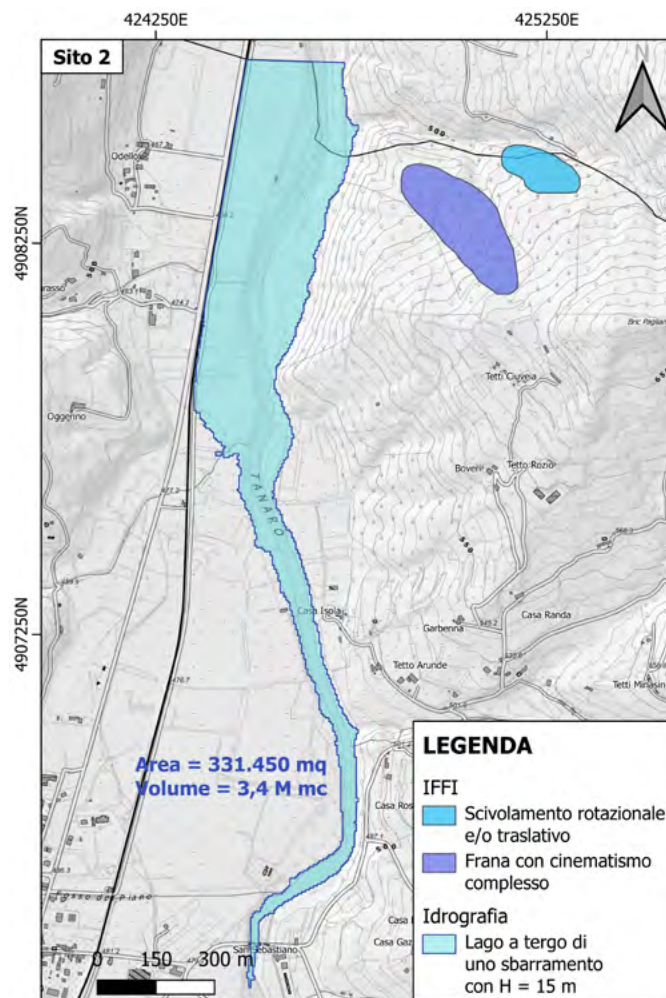


Figura 6. Ubicazione dello sbarramento ipotizzato tra Bagnasco e Nucetto

antropizzati. In un primo momento, era sembrato idoneo il settore, in gran parte posto sul confine comunale, compreso tra la frazione di *Isola Perosa* nel comune di Ormea e la frazione di *Frazione Trappa* (*repetita iuvant*, ma ufficialmente è proprio così...) nel comune di Garessio. Successivamente, la presenza di numerosi tralicci della linea di alta tensione che corre in quel tratto di fondovalle ha portato ad escludere il sito da quelli proposti come casse di espansione, almeno fino a quando non si troveranno soluzioni tecniche per superare il problema.

PROPOSTA DI INTERVENTO TRA PRIOLA E BAGNASCO

Il primo sito (Sito 1) proposto in questo lavoro come cassa di espansione in linea col Fiume Tanaro al fine di mitigare il rischio di alluvione per la città di Ceva è invece ubicato più a valle, in comune di Priola (Fig. 5). L'area era già stata individuata come idonea per la realizzazione di una cassa di espansione in uno studio sui nodi critici del Bacino Idrografico del Fiume Po condotto dall'Autorità di Bacino del F. Po. In particolare nel Nodo critico Tanaro - TA01

- Ceva Tavola 1 (Rif. WEB n. 2). Nelle tavole dello studio viene indicata genericamente la zona senza delimitazioni precise né quantificazioni di aree o di volumi ma solo con l'indicazione di una percentuale di una riduzione minima della piena di progetto.

Lo sbarramento previsto dal presente lavoro corre praticamente sul confine col comune di Bagnasco. Sarà alto al massimo 16 m, in modo tale da trattenere l'acqua in caso di piena fino all'isoipsa 520 m s.l.m.. Per impedire all'acqua di invadere la SS 28 Nord, bisognerà alzare di qualche metro il tratto della massicciata ferroviaria posta in sinistra idrografica, dall'altezza dello sbarramento fino ad intercettare a monte la suddetta isoipsa 520.

In tal modo, la configurazione ipotizzata può consentire di stoccare al colmo un volume di 6,9 milioni di m³ di acqua, creando un bacino di laminazione con una superficie di 672.570 m².

PROPOSTA DI INTERVENTO TRA BAGNASCO E NUCETTO

Il secondo sito (Sito 2) identificato nel lavoro prevede uno sbarramento

ubicato circa 6,5 km più a valle del primo, al confine tra il comune di Bagnasco e quello di Nucetto (Fig. 6).

Anche tale area era già stata individuata come idonea per la realizzazione di una cassa di espansione nel citato studio sui nodi critici del Bacino Idrografico del Fiume Po condotto dall'Autorità di Bacino del F. Po, sempre nel Nodo critico Tanaro - TA01 - Ceva, ma nella Tavola 2 (Rif. WEB n. 2).

Anche in questo caso viene indicata genericamente la zona senza delimitazioni precise né quantificazioni di aree o di volumi.

Lo sbarramento previsto sarà alto al massimo 15 m, e potrà trattenere l'acqua in caso di piena fino all'isoipsa 470 m s.l.m.

Come nel caso precedente, per impedire all'acqua di invadere la SS 28 Nord, bisognerà sopraelevare di qualche metro il tratto della massicciata ferroviaria posta in sinistra idrografica, dall'altezza dello sbarramento fino ad intercettare a monte la suddetta isoipsa 470.

La configurazione ipotizzata potrà consentire di stoccare al colmo un volume di 3,4 milioni di m³ di acqua, creando un bacino di laminazione nel

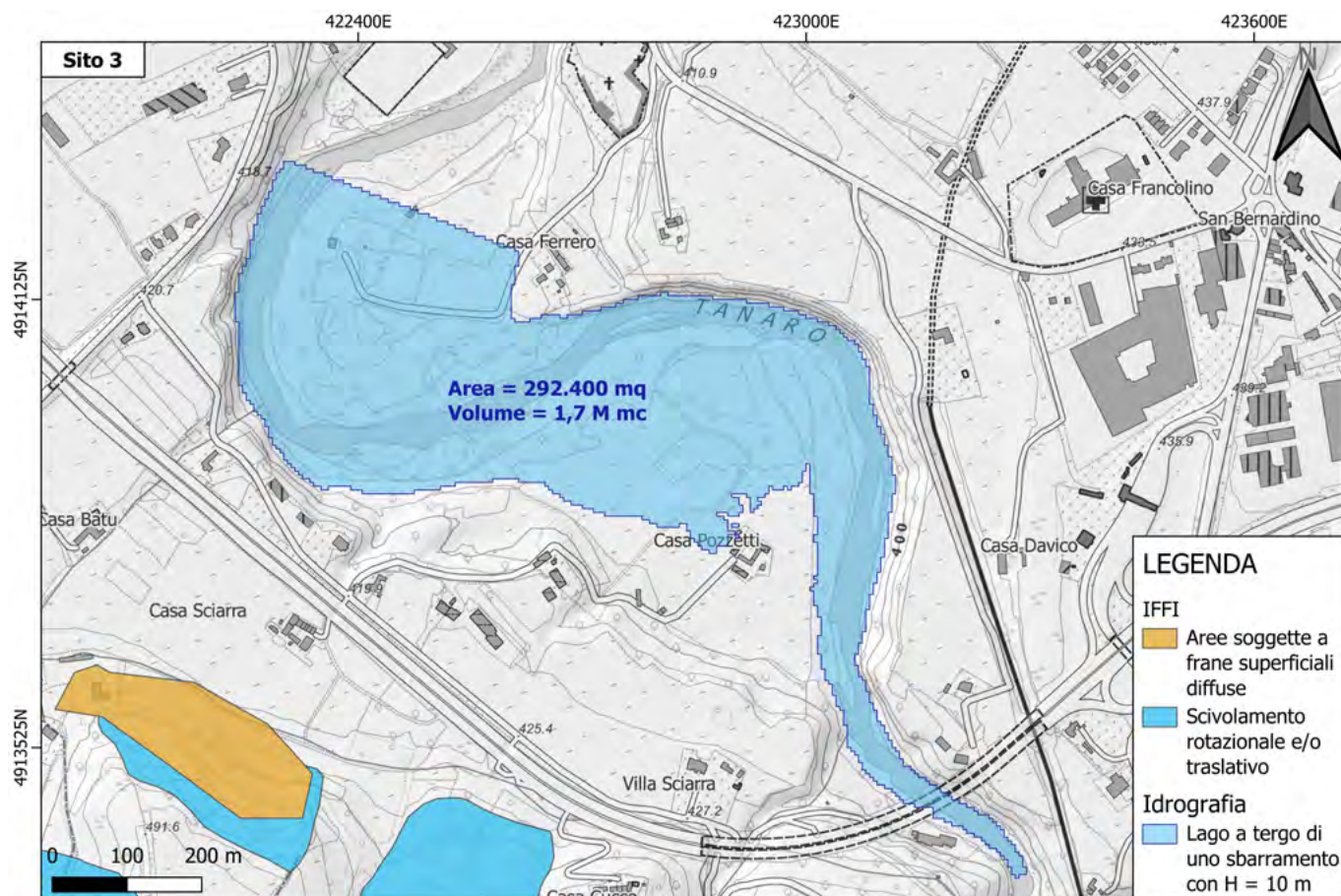


Figura 7. Ubicazione dello sbarramento ipotizzato appena a monte dell'abitato di Ceva

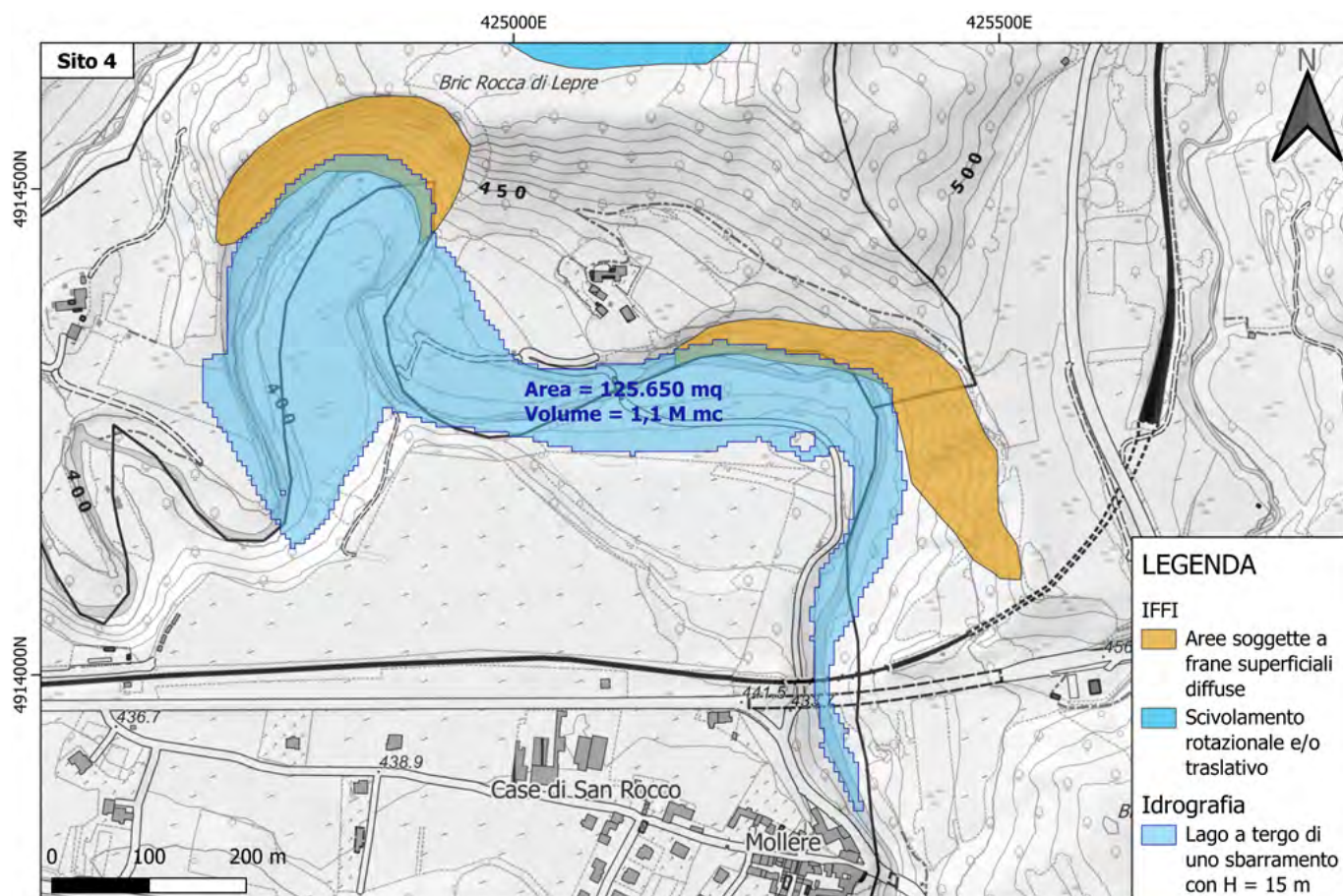


Figura 8. Ubicazione dello sbarramento ipotizzato sul T. Cevetta

territorio comunale di Bagnasco, con una superficie di 331.450 m².

PROPOSTA DI INTERVENTO APPENA A MONTE DI CEVA

Il terzo e ultimo sito sul F. Tanaro (Sito 3) identificato nel presente lavoro prevede uno sbarramento ubicato nel comune di Ceva, appena a monte del tratto del corso d'acqua compreso tra il cimitero in sponda destra e il campo di calcio in sinistra (Fig. 7).

Lo sbarramento previsto sarà alto al massimo 10 m e si svilupperà dalla strada che dal cimitero di Ceva porta a Case Ferrero in destra idrografica e correrà a quota 385 m s.l.m. fino a raggiungere la sinistra idrografica.

La configurazione ipotizzata potrà consentire di stoccare al colmo un volume di 1,7 milioni di m³ di acqua, creando un bacino di laminazione nel territorio comunale di Ceva, con una superficie di 292.400 m².

PROPOSTA DI INTERVENTO SUL CEVETTA

La Città di Ceva sorge alla confluenza del T. Cevetta col F. Tanaro. Questo affluente ha un bacino imbrifero molto esteso (oltre 100 km²) e, in occasione di alcuni eventi alluvionali (ad es. nel 1994), è esondato, contribuendo anch'esso all'inondazione del borgo storico di Ceva. Per tale motivo, nello studio si è ipotizzato anche un serbatoio di laminazione sul T. Cevetta (Sito 4), ubicato a est del centro abitato, appena a valle di frazione Mollere (Fig. 8).

Lo sbarramento e la retrostante cassa di espansione sono stati ipotizzati in un settore ove il torrente ha un andamento meandriforme. Pertanto, in fase di realizzazione, bisognerà prevedere anche degli interventi di sistemazione dei versanti, in modo da mitigare, oltre che il rischio di inondazione a valle dello sbarramento, anche l'erosione in corrispondenza delle sponde esterne dei meandri, peraltro già interessate da frane superficiali diffuse. Lo sbarramento previsto sarà alto al massimo 15 m, e potrà trattenere l'acqua di piena fino all'isoipsa 415 m s.l.m., creando un bacino che al colmo occuperà una superficie di 125.650 m², senza interessare le abitazioni presenti in zona. La configurazione ipotizzata potrà consentire di stoccare al colmo un volume di 1,1 milioni di m³ di acqua.

Bisogna considerare che, poiché il T. Cevetta confluisce nel F. Tanaro a valle della città di Ceva, quest'ultimo inter-

vento proposto potrà mitigare il rischio di inondazione della parte orientale del Borgo e della zona della stazione ferroviaria, mentre tutti gli altri interventi citati finora sono volti a salvaguardare la parte occidentale della città che si affaccia direttamente sul F. Tanaro.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Il lavoro svolto ha messo in luce che dal punto di vista morfologico, a monte della Città di Ceva c'è l'opportunità di intercettare volumi di acqua confrontabili con quelli relativi agli sbarramenti ipotizzati a monte di Ormea. Questo risultato oggettivo porta alla conclusione che si potrebbe ottenere un significativo risultato nella mitigazione del rischio di inondazione del capoluogo Cebano qualora si realizzassero le opere di laminazione suggerite. Oltre all'aspetto morfologico, bisogna però mettere in evidenza anche le problematiche relative alla normativa vigente sugli sbarramenti e le vasche e i serbatoi di laminazione. Prima di tutto la legge prevede che opere di sbarramento, dighe di ritenuta o traverse etc., che superano i 15 metri di altezza o che determinano un volume d'invaso superiore a 1.000.000 di metri cubi sono di competenza statale. Questo fatto sicuramente comporta tempi maggiori di realizzazione rispetto a un controllo regionale.

Poi c'è l'aspetto che riguarda la presenza di movimenti franosi segnalati dalla cartografia ufficiale nelle zone interessate dagli sbarramenti o dai bacini al colmo retrostanti. Qualora questa condizione non comportasse un inammissibilità tout court, sicuramente procurerebbe ulteriori indagini sulla valutazione della stabilità dei versanti e sugli interventi da effettuare per rendere possibile le opere di difesa idraulica.

Infine un discorso particolare va fatto sulla vegetazione entro le casse di laminazione (Rif WEB n. 3): normalmente esse sono prive di acqua ma, nel momento in cui devono entrare in funzione, la vegetazione non deve costituire ostacolo per il loro funzionamento. In letteratura si consiglia la coltivazione di granaglie, prati o comunque si suggerisce il controllo della crescita di piante di alto fusto che possono deviare il corso dell'acqua rispetto a quello pianificato. Tuttavia l'acqua in ingresso nelle casse non ha energia a sufficienza per poter asportare le piante di alto fusto, mentre le specie erbacee possono comportare problemi sul mantenimento officioso degli scarichi. Il problema può essere

risolto, seminando o controllando lo sviluppo della vegetazione in funzione del periodo in cui ricorrono le piene del corso d'acqua in esame, del grado di manutenzione e delle opere di scarico.

BIBLIOGRAFIA

- MAURO BONASERA, ANNA MARI A FERRERO, GIANDOMENICO FUBELLI, LUCIANO MASCIOTTO, ADRIANO NOCERA, ELEONORA VIVIANI (2020), *Pericolosità idrologica della Città di Ceva (CN)*. In Atti del Seminario Nazionale "Analisi e attività di mitigazione dei processi geo-idrologici in Italia". Geologia dell'Ambiente, Periodico trimestrale della SIGEA – Società Italiana di Geologia Ambientale, Supplemento al N. 1/2020, Anno XXVIII - gennaio-marzo 2020, 105-112, ISSN 1591-5352
- MAURO BONASERA, ANNALISA BOVE, ANNA MARIA FERRERO, GIANDOMENICO FUBELLI, MICHELE LICATA, LUCIANO MASCIOTTO, BATTISTA TABONI, GESSICA UMILI (2022), *Proposta per la mitigazione del rischio geo-idrologico nell'Alta Val Tanaro (provincia di Cuneo - Italia nord-occidentale)*. In: "Geologia Ambientale in Piemonte e Valle d'Aosta". Edizioni SIGEA, Collana: Monografie di Geologia Ambientale (2-2022), 45-55, ISBN 979-12-80811-01-1
- REGIONE PIEMONTE (2011), *Manuale tecnico per la progettazione, costruzione e gestione degli sbarramenti ed invasi di competenza regionale*.

RIFERIMENTI WEB

- Rif. WEB n. 1 - <https://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/cartella-progetti-in-corso/suolo-e-territorio-1/iffi-inventario-dei-fenomeni-franosi-in-italia>
- Rif. WEB n. 2 - https://www.adbpo.it/PAI/1%20-%20Relazione%20generale/1.3%20-%20All.1-%20Analisi%20dei%20principali%20punti%20critici/Volume1/25_TavoleTA01.pdf
- Rif. WEB n. 3 - https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2018-11/manuale_tecnico_sbarramenti.pdf

La pianificazione del territorio e la mitigazione del rischio sismico attraverso gli studi di microzonazione sismica

Sergio Castenetto

già Dipartimento della Protezione Civile,
CNR IGAG

E-mail: s.castenetto@gmail.com

Land use planning and seismic risk reduction through seismic microzonation studies

Parole chiave: terremoto; rischio sismico; pianificazione territoriale; effetti cosismici; microzonazione sismica

Key words: earthquake; seismic risk; land use planning; coseismic effects; seismic microzonation

1. INTRODUZIONE

La microzonazione sismica (MS) si pone l'obiettivo di definire la pericolosità sismica locale attraverso l'individuazione di zone o porzioni di territorio caratterizzate da un comportamento sismico omogeneo. Nello specifico la MS individua e caratterizza:

- *Zone stabili*, zone nelle quali non si ipotizzano effetti locali di alcuna natura (litotipi assimilabili al substrato sismico in affioramento con morfologia pianeggiante o poco inclinata) e pertanto gli scuotimenti attesi sono equivalenti a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- *Zone stabili suscettibili di amplificazione sismica*, le zone in cui il moto sismico viene modificato a causa delle caratteristiche litostratigrafiche e/o geomorfologiche del territorio;
- *Zone suscettibili di instabilità*, le zone suscettibili di attivazione dei fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazione superficiale).

Gli studi di MS rivestono una notevole importanza nella pianificazione territoriale, al fine di stabilire gerarchie di pericolosità utili per la programmazione degli interventi di riduzione del rischio sismico a varie scale, orientare la scelta di aree per nuovi insediamenti, definire gli interventi ammissibili in una determinata area, programmare le indagini e i livelli di approfondimento, stabilire modalità e priorità di intervento nelle aree urbanizzate.

L'Italia ha una lunga storia nel campo degli studi di microzonazione sismica, contraddistinta da una continua evoluzione sia nelle modalità di realizzazione

degli studi, sia nella loro applicazione alla mitigazione del rischio sismico e al processo di ricostruzione dopo forti terremoti. Studi pionieristici di MS sono iniziati negli anni '70 del secolo scorso, dopo i terremoti di Ancona del 1972 e del Friuli del 1976, e successivamente dopo il terremoto dell'Irpinia del 1980 (Fig. 1), mentre approcci quantitativi più moderni sono stati realizzati dopo i terremoti di Umbria-Marche del 1997, del Pollino 1998 e del Molise 2002. Fino ad una ventina di anni fa, dunque, gli esempi di caratterizzazione del territo-

rio in chiave sismica erano pochi e disomogenei, e poche anche le ricadute dei risultati sulla ricostruzione. Del tutto assenti casi di applicazione alla pianificazione territoriale in chiave preventiva.

Nel 2008 vengono approvati dal Dipartimento della Protezione civile e dalla Conferenza delle Regioni e Province autonome gli "Indirizzi e criteri per gli studi di microzonazione sismica" (ICMS, Gruppo di lavoro MS, 2008). Questi indirizzi informano non solo su come condurre studi volti a identificare e caratterizzare in caso di terremoto aree stabili,

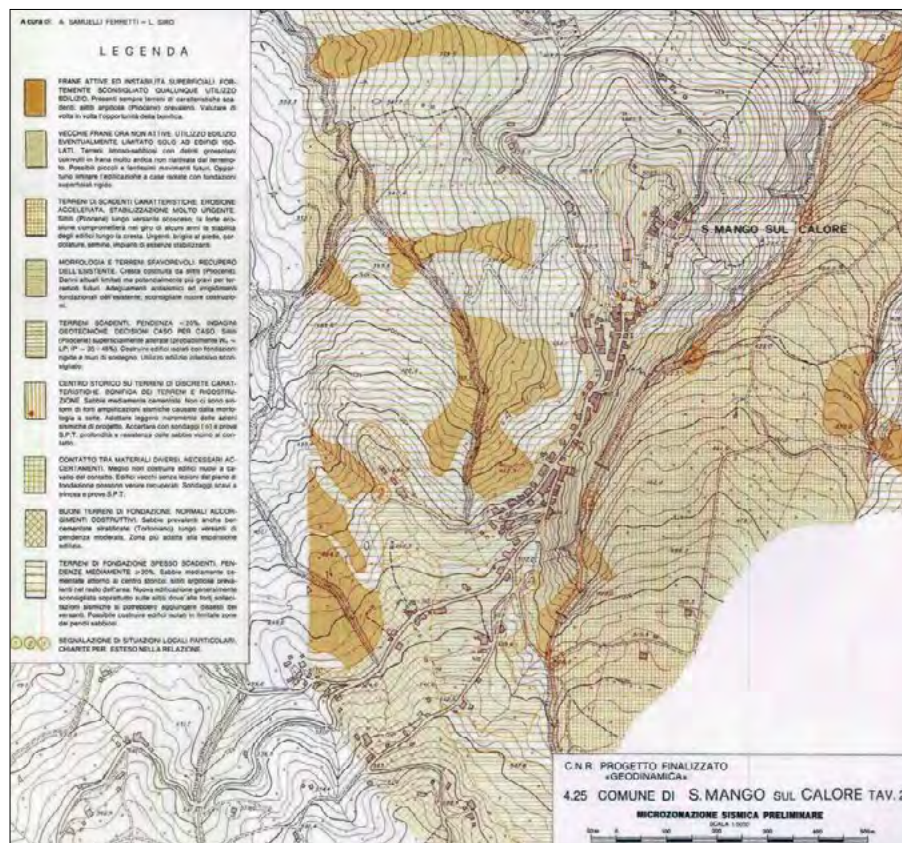


Figura 1. Esempio di carta di microzonazione sismica realizzata dopo il terremoto irpino del 23 novembre 1980 (Samuelli-Ferretti, Siro, 1983)

aree stabili suscettibili di amplificazioni locali e aree soggette a instabilità, ma anche sull'utilizzo degli esiti degli studi per la gestione del territorio, la pianificazione dell'emergenza, la ricostruzione post-terremoto e la progettazione strutturale.

Altra importante novità introdotta dagli ICMS la differenziazione degli studi in diversi livelli di approfondimento, con crescente complessità e impegno di risorse. In relazione ai diversi contesti geologico-tecnici, alla pericolosità sismica di base ed in funzione dei diversi obiettivi, gli studi di MS possono, infatti, essere realizzati con tre livelli di approfondimento:

- il *livello 1* è un livello propedeutico, che consiste esclusivamente in una raccolta organica e ragionata di dati di natura geologica, geofisica e geotecnica e delle informazioni preesistenti e/o acquisite appositamente al fine di suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee dal punto di vista del comportamento sismico. Tale livello è finalizzato alla realizzazione della carta delle "Microzone Omogenee in prospettiva sismica (MOPS)";
- il *livello 2* è un livello successivo in cui si introduce l'elemento quantitativo associato alle zone omogenee mediante metodologie di analisi numerica di tipo semplificato (abacchi regionalizzati, modellazione 1D, leggi empiriche) e l'esecuzione di ulteriori e più mirate indagini. Tale approfondimento è finalizzato alla realizzazione della "Carta di Microzonazione Sismica (MS)";
- il *livello 3* rappresenta il livello più approfondito che permette di giungere ad una microzonazione approfondita del territorio basata su metodologie analitiche di analisi di tipo quantitativo. Tale approfondimento è finalizzato alla realizzazione della "Carta di Microzonazione Sismica con approfondimenti".

Il 2008 rappresenta, dunque, un momento di svolta per gli studi di MS e gli "Indirizzi e criteri" divengono, da allora, il riferimento nazionale, insostituibile per chiunque intenda affrontare la caratterizzazione della pericolosità sismica locale nel nostro Paese.

2. IL PIANO NAZIONALE PER LA PREVENZIONE DEL RISCHIO SISMICO

Con la Legge 77/2009 (Legge Abruzzo), relativa alla ricostruzione delle aree colpite dal disastroso terremoto Aquilano del 2009, viene stanziata

quasi un miliardo di euro, distribuito su sette annualità, per la realizzazione di un programma di interventi mirati alla prevenzione del rischio sismico sul territorio italiano. Il Piano Nazionale per la Prevenzione Sismica mirava principalmente a ridurre la perdita di vite umane e a migliorare la gestione delle emergenze nelle aree a più elevata pericolosità sismica, caratterizzate da $ag \geq 0,125g$. Attraverso tale programma, che ha superato il decimo anno di attività, sono stati finanziati alle Regioni oltre 4000 studi di MS (Tab. 1 e Fig. 2), di cui oltre 3000 già realizzati e risultati conformi agli indirizzi e standard nazionali (Commissione Tecnica MS, 2019), a seguito della verifica e conseguente parere di conformità espresso da una apposita Commissione tecnica interistituzionale di supporto e monitoraggio, presso il Dipartimento della Protezione civile (DPC), alla quale partecipano tutte le Regioni e gli ordini professionali (geo-

logi, ingegneri, architetti, geometri), oltre che i rappresentanti delle associazioni territoriali (ANCI, UPI, UNCEM).

Nei dieci anni di attività molte cose sono cambiate, sono state migliorate, rese più efficienti facendo tesoro dell'esperienza che si andava maturando. L'intera attività ha visto la piena partecipazione delle Regioni, che hanno legiferato per recepire nella pianificazione territoriale la MS, rendendola un elaborato obbligatorio per la procedura tecnico amministrativa di approvazione dei piani comunali.

Le elaborazioni statistiche preliminari effettuate su un campione di circa 2400 studi risultati conformi agli standard nazionali, mostrano che solo il 9% della superficie del territorio studiato ricade in aree stabili senza effetti di amplificazione, mentre circa il 21% si trova in aree soggette a instabilità e il restante 70% in aree suscettibili di amplificazione. Interessante l'analisi della distribuzione delle tipologie di instabilità: il dissesto

Tabella 1. Quadro dello stato di attuazione degli studi di MS finanziati con i fondi dell'art. 11 L. 77/2009, distinti per annualità e ordinanza, al 31.12.2022

Ordinanze	Studi di MS				
	Programmati		Consegnati		Validati
		n.	%	n.	%
3907/2010	401	401	100,0	399	99,5
4007/2012	703	629	89,4	549	87,2
52/2013	909	805	88,6	603	74,9
171/2014	629	525	83,4	375	71,4
293/2015	381	292	76,6	278	95,2
344/2016	653	497	76,1	303	60,9
532/2018	588	251	42,6	209	83,2
Totale	4264	3400	79,7	2716	79,8

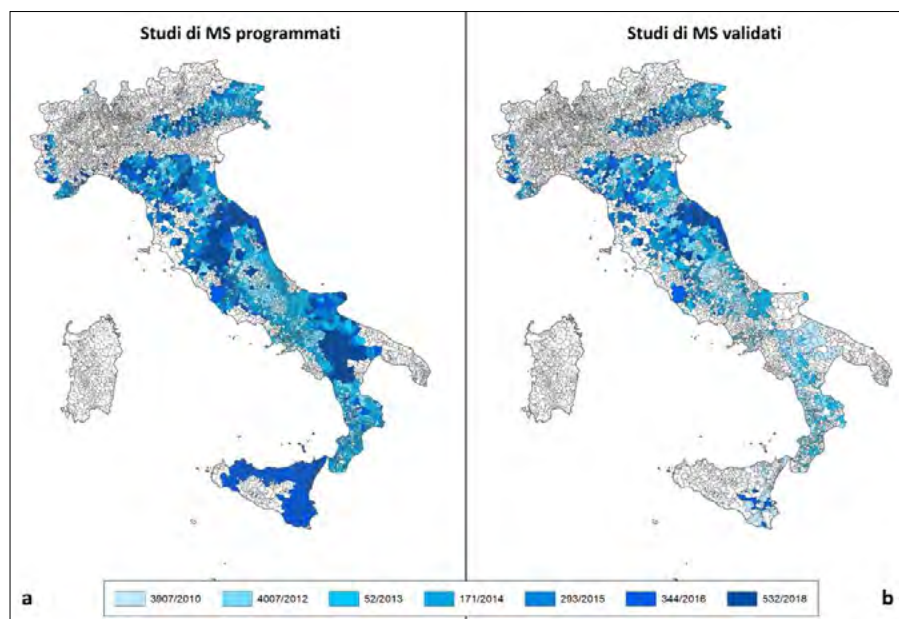


Figura 2. Distribuzione dei territori oggetto degli studi di MS finanziati con i fondi dell'art. 11 (L. 77/09) distinti per annualità di finanziamento, programmati (a) e validati (b) al 31/12/2022

Tabella 2. Superfici (kmq) per tipo di zona e per Regione (valori percentuali)

Regione	Numero Comuni	Superficie MS	Sup zone stabili	Sup zone stabili SA	Sup zone instabili	Zone instabili				
						Frane	Liqu	Faglie	Cedi menti	Inst sovrapp
Abruzzo	193	100	2,12	68,20	29,67	19,03	9,15	0,98	0,08	0,42
Basilicata	85	100	4,70	77,78	17,52	13,85	3,17	0,23	0,13	0,14
Calabria	217	100	3,91	72,39	23,70	11,02	9,56	2,02	0,25	0,85
Campania	155	100	15,31	62,10	22,58	11,37	7,58	1,98	1,24	0,38
Emilia-Romagna	250	100	3,93	66,03	30,04	10,32	16,93	0,03	2,21	0,54
Friuli-Venezia Giulia	192	100	4,19	72,20	23,60	3,42	18,62	0,92	0,47	0,18
Lazio	183	100	19,28	71,74	8,98	7,03	1,41	0,11	0,35	0,07
Liguria	66	100	58,11	18,27	23,62	11,01	11,77	0,30	0,20	0,34
Lombardia	61	100	27,41	61,83	10,76	6,61	2,68	0,41	1,05	0,00
Marche	240	100	1,60	77,28	21,12	16,14	4,81	0,05	0,08	0,02
Molise	130	100	26,69	65,56	7,75	7,09	0,07	0,54	0,00	0,04
Piemonte	59	100	21,04	74,39	4,57	4,54	0,01		0,02	
Puglia	26	100	9,43	82,28	8,29	3,83	4,14			0,32
Sicilia	71	100	0,33	88,91	10,76	2,95	5,31	1,92	0,28	0,30
Toscana	149	100	4,96	79,89	15,15	7,91	6,14	0,28	0,62	0,21
Umbria	88	100	13,39	80,68	5,93	3,57	0,39	0,06	1,85	0,06
Veneto	231	100	0,75	69,58	29,66	3,57	19,18	1,47	4,38	1,07
Totale	2.396	100	8,47	70,02	21,51	9,08	10,06	0,66	1,28	0,42

di versante e le liquefazioni sono le più rappresentate (9% e 10%), mentre meno del 1% di superficie del territorio esaminato, classificato instabile, è dovuto alla presenza di faglie attive e capaci (Tab. 2).

Queste statistiche generali sottolineano l'importanza fondamentale della MS per identificare i problemi di sicurezza da affrontare quando si pianificano gli sviluppi urbanistici futuri di un comune e le future misure di mitigazione del rischio. Con tale finalità gli ICMS sono stati integrati da specifiche linee guida per la gestione del territorio interessato da instabilità cosismiche (faglie attive e capaci, instabilità di versante, fenomeni di liquefazione, densificazioni sismoindotte).

3. LE LINEE GUIDA PER LA PIANIFICAZIONE DEL TERRITORIO

L'obiettivo principale delle linee guida riguardanti la gestione del territorio interessato da instabilità sismoindotte (Fig. 3) è definire i criteri generali e le procedure operative, in coordinamento tra lo Stato, le Regioni e gli Enti Locali, per:

- raccogliere accurate informazioni sul rischio indotto dalla presenza di terreni suscettibili di instabilità cosismiche;
- mitigare il rischio nelle aree con previsioni di trasformazione;
- mitigare il rischio nelle aree edificate.



Figura 3. Copertina della versione in inglese delle Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da faglie attive e capaci

Le linee guida, approvate dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (articolo 5, comma 7, OPCM 13 novembre 2010, n. 3907) sono:

- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (**FAC**)
- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Liquefazioni (**LQ**)
- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Densificazione indotta dall'Azione Sismica (**DAS**)
- Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (**FR**).

Le integrazioni introdotte per le diverse instabilità a supporto e aggiornamento degli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" (ICMS) (Gruppo di Lavoro MS, 2008) sono, in particolare:

FAC: negli ICMS 08 la pericolosità da fagliazione di superficie viene trattata nelle "Schede tecniche" prevedendo, per la prima volta in Italia, una zona di rispetto a cavallo della traccia della faglia di 15+15 m, nel caso di faglia attiva e capace certa, e 75+75 m per una faglia incerta. La scheda fornisce indicazioni relative al fenomeno della fagliazione di superficie e definisce "attiva" una faglia che mostra evidenze di almeno una attivazione negli ultimi 40.000 anni, prescrivendo analisi paleosismologiche per l'accertamento delle sue caratteristiche geometriche e sismogenetiche. La scheda, tuttavia, non affronta il tema delle limitazioni d'uso del territorio da introdurre nelle aree interessate dalle rotture della superficie. A seguito del terremoto aquilano del 2009, una faglia attiva e capace (faglia di Paganica) ha interessato una parte di territorio occupato da manufatti di varia tipologia (edifici, strade, lifelines, ecc.), spingendo la Regione Abruzzo a richiedere la collaborazione del Dipartimento della Protezione Civile (DPC) per definire i criteri di gestione delle aree limitrofe alla faglia. Il DPC ha quindi costituito un Gruppo di Lavoro formato da esperti di varia estrazione (geologi del terremoto, ingegneri strutturisti e architetti pianificatori) per affrontare il problema in termini generali e definire le linee guida per trattare la pericolosità da fagliazione di superficie ai fini della Microzonazione Sismica (Commissione tecnica MS, 2015), considerando esclusivamente il fenomeno fisico relativo alla rottura della superficie, tralasciando altre pericolosità strettamente legate alle faglie attive,

come ad esempio gli effetti dinamici di campo vicino (near fault).

LQ: per i fenomeni di liquefazione, sono state introdotte modifiche e integrazioni a quanto indicato negli ICMS, anche alla luce dell'esperienza del terremoto padano-emiliano del maggio 2012 e degli studi ad esso seguiti, sia relativamente alle metodologie di studio dei caratteri predisponenti che alla definizione di parametri utili a definire, in funzione dei valori attribuiti, modalità diverse d'uso del suolo e indicazioni per gli interventi di mitigazione della pericolosità (Commissione Tecnica MS, 2017).

DAS: per lo studio delle aree soggette a cedimenti differenziali, è stato necessario chiarire la fenomenologia dei cedimenti differenziali nell'ambito degli studi di Microzonazione Sismica (MS), in quanto, in assenza di specifiche indicazioni, le aree potenzialmente interessate da cedimenti differenziali sono state spesso individuate in corrispondenza di contatti stratigrafici e tettonici tra terreni con caratteristiche meccaniche marcatamente differenti (ICMS). Partendo dalla considerazione che il cedimento differenziale è difficilmente stimabile alla scala areale tipica degli studi di MS, il problema è stato studiato riconducendo il fenomeno a quello della Densificazione indotta dall'Azione Sismica (DAS), fornendo stime di cedimento (risultante dalla deformazione volumetrica sismoindotta dei materiali interessati) su contesti areali in cui è presente una certa variabilità delle condizioni geologico-geotecniche del sottosuolo e una intensità dell'azione sismica adeguata all'insorgere del fenomeno (Commissione Tecnica MS, 2022).

FR: per le frane le apposite linee guida trattano unicamente le "instabilità di versante sismoindotte", che devono il loro movimento cioè, oltre a caratteri predisponenti, alla forzante sismica. Pertanto, si rimanda ad altri documenti la trattazione del fenomeno generale delle instabilità di versante s.l. È importante sottolineare, inoltre, che per le instabilità gli studi di MS, anche di livello avanzato, non sono esaustivi per una valutazione della pericolosità, come pure per la progettazione delle opere di messa in sicurezza, che richiedono specifici approfondimenti e ulteriori indagini sul singolo movimento franoso osservato (Commissione tecnica MS, 2015).

I documenti sono stati redatti in collaborazione con alcune Regioni, che hanno inteso condividere delle specifiche esperienze territoriali, e con il supporto di alcune università ed enti di ricerca,

tra i quali il CNR IGAG che fornisce il supporto tecnico scientifico alla Commissione Tecnica MS nazionale, coordinata dal Dipartimento della Protezione civile. Nelle procedure individuate nelle linee guida si è anche fatto riferimento alle esperienze maturate in occasione dei recenti terremoti che hanno interessato il nostro paese e agli studi ad essi seguiti. I principi generali seguiti nella predisposizione delle linee guida sono:

- fissare dei livelli minimi di conoscenza (elementi informativi minimi) al fine di evitare che negli studi di MS si individuino zone potenzialmente instabili quando non siano stati raccolti dati sufficientemente affidabili;
- definire procedure standard per l'individuazione delle zone di instabilità in funzione della tipologia, della qualità delle indagini svolte e dei metodi di analisi;
- specificare il grado di incertezza dei risultati;
- definire il sistema di rappresentazione delle zone di instabilità;
- disciplinare gli usi del territorio, sia dal punto di vista urbanistico che dal punto di vista delle classi d'uso dei manufatti.

L'applicazione delle linee guida, in funzione del livello di approfondimento degli studi (livello 1, 2 o 3 di MS) e quindi del livello di conoscenza del fenomeno atteso, consente l'identificazione di zone di attenzione, di suscettibilità e di rispetto, alle quali corrispondono, in funzione della categoria urbanistica (aree edificate, non edificate, soggette a trasformazione) specifiche norme di gestione del territorio.

Concettualmente, il significato dei tre tipi di zone è il seguente:

- **Zone di Attenzione (ZA):** sono zone nelle quali i dati a disposizione indicano la presenza di condizioni predisponenti l'instabilità in esame ma non sono sufficienti, in quantità e tipologia, per definire se l'instabilità possa effettivamente verificarsi in caso di evento sismico; è possibile, tuttavia, ad esempio attraverso la consultazione di cataloghi, stabilire la presenza e/o l'accadimento di eventuali fenomeni in occasione di eventi sismici passati (livello 1 di MS, Carta delle MOPS);
- **Zone di Suscettibilità (ZS):** sono zone nelle quali, a seguito di una raccolta dati specifica per l'instabilità in esame e l'applicazione di metodi di analisi il più delle volte semplificati, è possibile fornire una prima valuta-

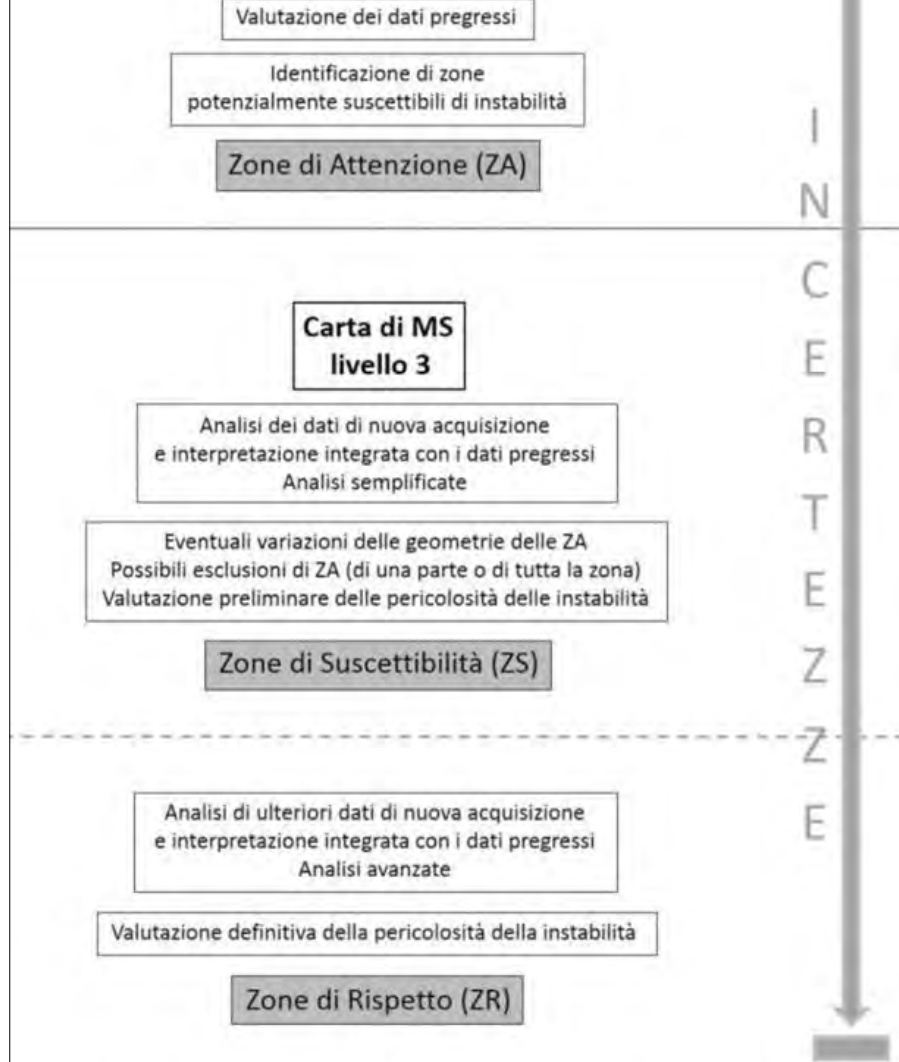


Figura 4. Schema illustrativo del tipo di zona di instabilità nelle carte MOPS e MS. La raccolta dati e le analisi permettono di ridurre le incertezze dal livello 1 al livello 3.

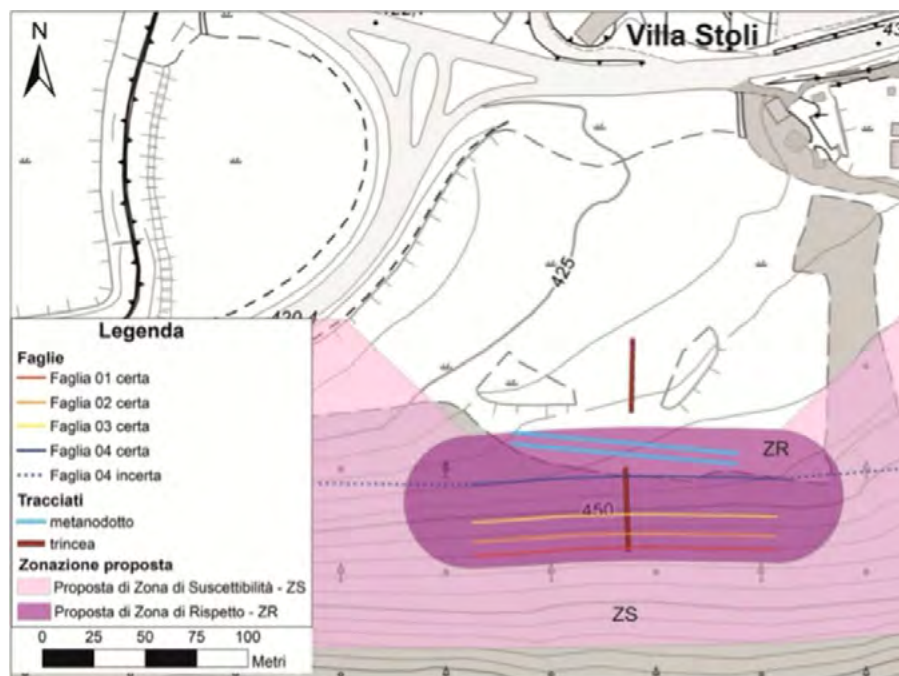


Figura 5. Esempio di applicazione delle linee guida FAC al territorio, con individuazione delle Zone di instabilità

- zione quantitativa della pericolosità (livello 2/3 di MS, Carta di MS);
- **Zone di Rispetto (ZR):** sono zone nelle quali l'applicazione di metodi di analisi avanzati (al fine di analizzare dettagliatamente aree limitate e/o particolarmente importanti), è

possibile quantificare in modo affidabile la pericolosità (livello 3 di MS, Carta di MS).

In Fig 4 è riportato uno schema, applicabile a tutte le principali instabilità sismoindotte (FAC, LQ, DAS e FR), che sintetizza le attività, i risultati attesi

e il tipo di zona suscettibile di instabilità nell'ambito dei diversi livelli di approfondimento degli studi di MS:

4. APPLICAZIONI AL TERRITORIO

La pianificazione urbanistica e territoriale in zone interessate dalla presenza di instabilità cosismiche (fagliazione superficiale, liquefazione, frane, densificazioni) è chiamata a disciplinare gli usi del suolo e le previsioni di trasformazione urbana, tenendo conto della relazione tra la pericolosità sismica e i diversi contesti insediativi. Nell'ambito degli strumenti di pianificazione urbanistica, la disciplina fa riferimento convenzionalmente a tre categorie di aree urbanistiche:

- **Aree edificate** (recenti o consolidate) Aree urbanizzate ed edificate di diverso livello di completamento, consolidamento e stratificazione. Comprendono centri storici, tessuti consolidati, aree in completamento con usi residenziali, produttivi, a servizio o misti.
- **Aree non edificate** (con previsione di trasformazione) Aree non edificate, parzialmente edificate o con previsione di nuovi insediamenti - residenziali, produttivi, a servizio o misti - di manufatti edilizi, di infrastrutture e reti. Tali aree possono trovarsi sia in adiacenza ad aree edificate, sia in contesti ancora non urbanizzati.
- **Aree non urbanizzate a trasformabilità limitata** Aree non edificabili o con limitate previsioni di edificabilità, sia per destinazione d'uso (aree agricole), che per la presenza di vincoli e forme di tutela.

Queste tre categorie vanno riferite alle previsioni dello strumento di piano vigente e alle sue effettive condizioni di attuazione. Ciascuna delle tre categorie di aree è definita da specifici caratteri insediativi, infrastrutturali e di destinazione d'uso la cui relazione con la presenza di Zone di Attenzione (ZA), Zone di suscettibilità (ZS) e Zone di Rispetto (ZR) va sottoposta a specifiche normative (Fig. 5).

Per quanto riguarda le specifiche articolazioni della normativa urbanistica nelle suddette aree, ogni Regione potrà predisporre opportune corrispondenze tra le tre categorie urbanistiche e le zone omogenee individuate dai rispettivi strumenti di governo del territorio. Tenuto conto di questo, la disciplina degli usi del suolo e delle previsioni di trasformazione nelle zone di instabilità viene

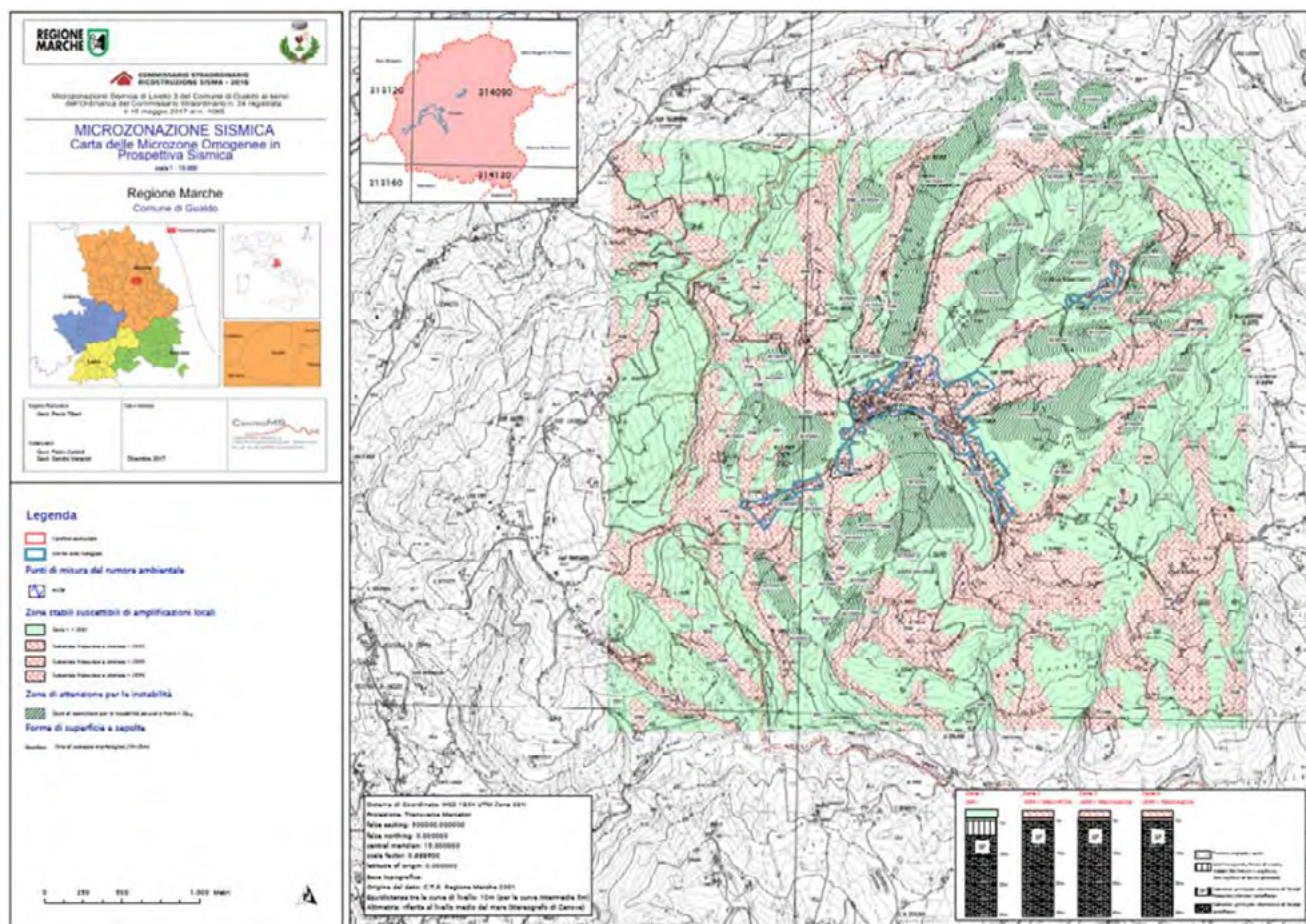


Figura 6. Carta delle MOPS realizzata in uno dei 138 comuni colpiti dal terremoto del 2016 in Italia centrale

articolata in una serie di indicazioni urbanistiche, che definiscono possibili regolamentazioni dello strumento urbanistico anche in termini di categorie di intervento, modalità attuative e di destinazioni d'uso: si va dagli obblighi di approfondimento della fenomenologia, alle limitazioni d'uso, sino al divieto di edificazione.

Come ricordato, le Linee guida sono state redatte con la collaborazione di funzionari tecnici regionali, che hanno riportato le esperienze territoriali specifiche, di ricercatori universitari e di altri enti di ricerca. Nelle procedure si è anche fatto riferimento alle esperienze maturate negli ultimi terremoti che hanno interessato il nostro Paese (es. L'Aquila 2009; Emilia, 2012; Italia Centrale, 2016) e agli studi ad essi seguiti per approfondire tematiche legate all'osservazione dei fenomeni cosismici che li hanno caratterizzati (rispettivamente faglie, liquefazioni, frane).

In particolare, dopo la sequenza sismica del Centro Italia 2016-17 allo scopo di accelerare il completamento degli studi e coadiuvare il processo di ricostruzione, sono stati stanziati dal Commissario per la ricostruzione i fondi necessari per gli studi MS di livello 3 dei 138 comuni delle Regioni Abruzzo, Lazio, Marche e Umbria colpiti dal ter-

remoto, che sono stati realizzati in pochi mesi dai professionisti, con l'assistenza tecnico-scientifica e consulenza della comunità scientifica, attraverso il Centro di Microzonazione Sismica e il DPC (Fig. 6). L'occasione ha consentito di affrontare le problematiche relative allo studio delle diverse tipologie di instabilità, in particolare di versante e legate alla fagliazione superficiale, risultando un'esperienza preziosa anche per applicare quanto previsto dalla Linee guida alla pianificazione del territorio.

I 50 anni di storia della microzonazione sismica in Italia sono quindi caratterizzati da una continua evoluzione, in cui i progressi scientifici sono stati sviluppati parallelamente ad applicazioni pratiche, attraverso l'impegno e gli sforzi della comunità scientifica e di tutti i soggetti coinvolti nelle politiche di riduzione del rischio sismico.

La microzonazione sismica, che ha visto in particolare negli ultimi dieci anni una significativa evoluzione e l'applicazione diffusa dei risultati al territorio, è oggi una metodologia di studio della pericolosità locale ormai consolidata, parte del bagaglio culturale dei professionisti, ben conosciuta e imprescindibile per affrontare la pianificazione del territorio o a supporto di scelte progettuali e nelle fasi di ricostruzione post-sisma.

BIBLIOGRAFIA

- COMMISSIONE TECNICA MS (2015), *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da instabilità di versante sismoindotte (FR)*, versione 1.0. Roma: Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile.
- COMMISSIONE TECNICA MS (2015), *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da Faglie Attive e Capaci (FAC)*, versione 1.0. Roma: Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile.
- COMMISSIONE TECNICA MS (2017), *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da liquefazioni (LQ)*, ver. 1.0. Roma: Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dip. della protezione civile.
- COMMISSIONE TECNICA MS. (2019), *Standard di rappresentazione e archiviazione informatica degli studi di MS vers.4.2.*
- COMMISSIONE TECNICA MS (2022), *Linee guida per la gestione del territorio in aree interessate da densificazioni sismoindotte (DAS)*, versione 1.0. Roma: Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della protezione civile.
- GRUPPO DI LAVORO MS (2008), *Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica*. Dip. della Protezione Civile e Conferenza delle Regioni e Province autonome; 3 vol. e 1 DVD. (<https://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/9-guidelines-for-seismic-microzonation>).
- SAMUELLI-FERRETTI A., SIRO L. (1983), *Comune di San Mango sul Calore (AV)*. In: *Indagini di microzonazione sismica CNR-PFG*, Pubbl. n. 492.

L'area Napoletana: sulla mitigazione del rischio vulcanico più alto al Mondo

The Neapolitan area: on the mitigation of the highest volcanic risk in the world

Parole chiave: area napoletana, rischio vulcanico, mitigazione del rischio
Key words: Neapolitan area, volcanic risk, risk mitigation

Giuseppe De Natale^{1,2}, Claudia Troise^{1,2}, Renato Somma^{1,3}, Massimo Buscema^{4,5}, Guido Maurelli⁴, Antonio Coviello³, Stefano Petrazzuoli⁶, Alfredo Trocciola⁷, Adriano Giannola⁸

¹ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Napoli (I)

² INO-CNR, Pozzuoli (NA) (I)

³ IRIS-CNR, Napoli (I)

⁴ Centro Ricerche SEMEION, Roma (I)

⁵ University of Colorado, Denver (USA)

⁶ Studio di Ingegneria Strutturale, Napoli (I)

⁷ ENEA, Portici, NA (I)

⁸ SVIMEZ, Roma (I)

E-mail: giuseppe.denatale@ingv.it

LA PREVISIONE DELLE ERUZIONI: UNA SCIENZA EMPIRICA E FORTEMENTE INCERTA

La previsione delle eruzioni vulcaniche per una evacuazione preventiva delle aree a rischio è l'unica difesa da un'eruzione imminente. Non esiste infatti alcuna possibile difesa alternativa contro i prodotti piroclastici di maggiore pericolosità (flussi piroclastici, flussi di lava particolarmente veloci, intensa caduta di pomici e cenri).

La previsione delle eruzioni, a livello mediatico ma anche talvolta in ambito accademico, è generalmente considerata semplicisticamente fattibile, al contrario della previsione dei terremoti che, altrettanto semplicisticamente, è considerata impossibile. Entrambe le affermazioni sono egualmente errate; la previsione delle eruzioni è considerata fattibile perché i vulcani sono strutture definite e ben localizzate, ed esistono fenomeni precursori di eruzioni largamente osservati; le zone sismiche sono invece molto estese, e difficili da monitorare specificamente. Il problema è che non è assolutamente definito, per un generico vulcano, quale sia il livello oltre il quale le anomalie fisico-chimiche genericamente considerate 'fenomeni precursori' annuncino un'eruzione imminente. Questo è vero anche, in generale, per vulcani con un'alta frequenza eruttiva osservata in epoca moderna; ed è ancor più vero per vulcani, come quelli dell'area Napoletana, quiescenti da molti decenni o da secoli: dal 1944 (Vesuvio), 1538 (Campi Flegrei) e 1302 (Ischia).

La previsione delle eruzioni, in realtà, è ancora una disciplina largamente empirica, con risultati fortemente incerti (Winson et al., 2014). Sebbene alcuni studi recenti stanno cercando di sviluppare tecniche di previsione con maggiori vincoli fisici (Kilburn, 2012; Robertson and Kilburn, 2016; Kilburn

et al., 2017), tali ricerche sono ancora ad uno stadio di ricerca scientifica di punta, di fatto non generalizzabili per un utilizzo pratico che dia garanzie di affidabilità.

Il problema della previsione delle eruzioni è schematizzabile come mostrato in Fig. 1.

Come si evince dalla figura, una previsione di successo avviene quando un allarme, definito dal superamento di una certa soglia di 'fenomeni precursori', è effettivamente seguito entro breve tempo da un'eruzione.

Seguendo la stessa logica, in contrasto con una previsione appropriata, ci possono essere due tipologie di errori: falso allarme e mancato allarme. Nel caso più generale, descritto dalla Fig. 1, un certo trend di anomalie fisico-chimiche (fenomeni precursori, che normalmente implicano aumento di sismicità, sollevamento del suolo e variazioni nella composizione chimica delle acque e dei gas)

cresce, fino ad arrivare eventualmente all'eruzione. Se un allarme è dato nella fase iniziale di crescita dei fenomeni, c'è una probabilità trascurabile di mancato allarme, ma una grande probabilità di falso allarme. Al contrario, quando si attende che i fenomeni anomali diventino estremamente marcati, si minimizza la probabilità di falso allarme ma si massimizza quella di mancato allarme: si rischia cioè che l'eruzione arrivi senza più avere il tempo di evacuare le aree esposte.

Allora, dato il completo 'trade off' tra probabilità di mancato allarme e di falso allarme, l'istante in cui dare effettivamente un allarme (che porti all'evacuazione) dovrebbe essere scelto in modo da minimizzare il 'costo': che nel caso di un falso allarme è proprio il costo, economico e sociale, di un'evacuazione inutile; mentre nel caso di un mancato allarme consiste nella perdita di innumerevoli vite umane.

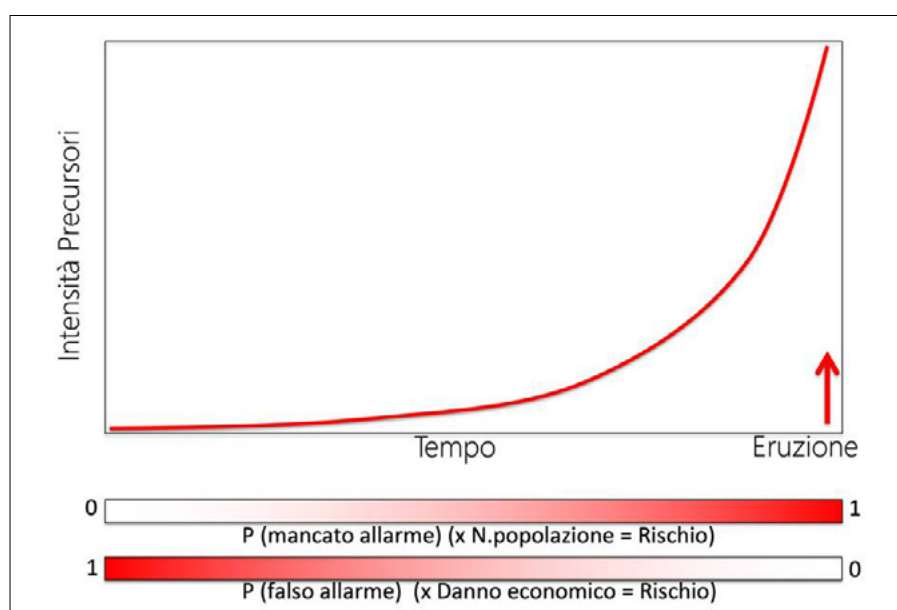


Figura 1. Schema di una evoluzione 'ideale' di segnali precursori di un'eruzione. Dichiarando un allarme nella fase iniziale della crescita dei precursori, si minimizza la probabilità di mancato allarme, ma si massimizza la probabilità di falso allarme. Al contrario, se si attende che i segnali precursori arrivino a livelli molto alti, la probabilità di falso allarme è bassa, ma è altissima quella di mancato allarme (ossia si rischia di dare l'allarme 'troppo tardi' per avere il tempo di evacuare l'area esposta)

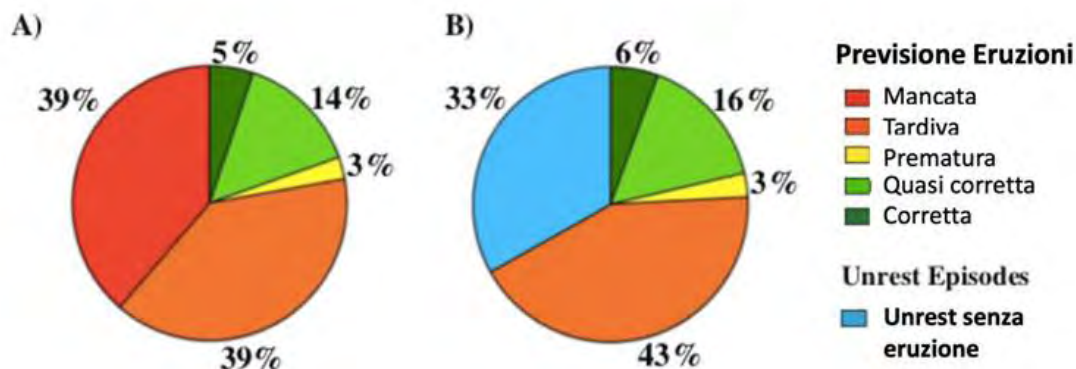


Figura 2. Percentuali di successi/insuccessi (in termini di frequenze relative) nella previsione di 194 eruzioni avvenute dal 1990 al 2013 (da Winson et al., 2014). (a) Frequenze relative del risultato della previsione di eruzioni, ciascuno indicato da un diverso colore. Nota che la frequenza cumulativa di previsioni più o meno corrette (tonalità di verde) è soltanto del 19% rispetto al totale. (b) Proporzione delle previsioni senza effettiva Eruzione (falso allarme) rappresentata come percentuale insieme a tutte le categorie mostrate in a) eccetto la prima ('mancata').

È dunque evidente che, nel caso di un numero enorme di abitanti esposti (come nel caso dell'area vulcanica Napoletana), la probabilità di mancato allarme può essere assolutamente insostenibile anche per valori molto bassi di probabilità di eruzione; di contro, però, un falso allarme potrebbe avere costi economici e sociali altissimi.

Una errata o del tutto assente considerazione di questo problema, nel caso in questione in cui il valore esposto è altissimo, può ulteriormente implicare pesantissime responsabilità, anche giuridiche, per i decisori.

L'estrema complessità e scarsa affidabilità delle attuali tecniche di previsione delle eruzioni, insieme alla criticità della mitigazione del rischio vulcanico quando esso assume valori estremi, è stata evidenziata in maniera molto completa da De Natale ed al. (2020). Una delle fonti principali, che consente di valutare l'attuale grado di attendibilità della previsione delle eruzioni, è data dal Consensus Study Report (2017), che riporta i risultati di tutti i tentativi di previsione delle eruzioni nel Mondo a partire dal 1980. La scelta del 1980 come anno zero non è causale, in quanto rappresenta l'anno dell'eruzione del Mount St. Helens (WA, USA), che può essere considerata il punto di partenza delle moderne tecniche di previsione delle eruzioni vulcaniche.

I risultati del Consensus Study Report (2017) indicano una percentuale di successi, nella previsione delle eruzioni, molto minore del 50%. Ancora più indicativi sono i risultati ottenuti da Winson et al. (2014), che analizzano i risultati nella previsione applicati a 194 eruzioni avvenute dal 1990 al 2013, da 60 vulcani nel Mondo.

La Fig. 2 mostra i risultati principali del loro studio: soltanto il 19% delle eruzioni furono anticipate con appropriati messaggi di allerta inviati alle autorità. Un tale pessimo risultato migliora di poco se si considerano solo le eruzioni più forti ($VEI > 3$): circa il 30% di queste eruzioni furono correttamente previste. Il risultato aumenta leggermente se si considerano solo i vulcani perfettamente monitorati, ma resta comunque sempre sotto il 50%. In aggiunta, lo studio riporta il 33% di allarmi eruzione non seguiti da eruzione (falsi allarmi).

In aggiunta, anche nei casi in cui la previsione è avvenuta con successo, bisogna tener conto di quanto tempo prima dell'eruzione sia stata possibile: l'esempio di maggior successo è infatti rappresentato dall'eruzione del vulcano Hekla nel 2000, per la quale l'eruzione fu prevista con molta precisione, ma soltanto mezz'ora prima che avvenisse (Stefansson, 2011). Ovviamente, una previsione con così breve anticipo è di fatto inutilizzabile per ordinare un'evacuazione di centinaia di migliaia (ma probabilmente anche di poche migliaia) di persone.

Questi risultati mostrano chiaramente che, con il livello attuale di conoscenza, è molto più probabile un mancato allarme, o anche un falso allarme, piuttosto che una previsione corretta. In tali condizioni, il 'problema della previsione', evidenziato dalla fig.1, diviene assolutamente drammatico in condizioni di rischio vulcanico estremo (ossia di numeri estremi di popolazione esposta al massimo rischio).

Prima di continuare la discussione di questo problema applicato al rischio estremo dell'area Napoletana, è utile richiamare gli elementi principali dei

Piani di Emergenza attuali elaborati per queste aree. Vogliamo qui sottolineare che non è qui nostra intenzione criticare il lavoro alla base di tali Piani, che è anzi assolutamente meritevole ed ha portato comunque ad un primo utile protocollo da attuare in un'eventuale emergenza. Il nostro intento è infatti costruttivo, e vuole indicare i molti punti deboli e l'assoluta necessità di completare ed integrare i protocolli attuali, in modo da renderli praticamente fattibili. Come vedremo, sebbene le informazioni alla base degli attuali piani costituiscano un'importante base di partenza, tutto l'impianto successivo deve essere necessariamente modificato ed integrato, per renderli razionale ed effettivamente applicabili.

Passiamo quindi a riassumere i punti principali degli attuali Piani di Emergenza:

- 1) definire una 'zona rossa', che di fatto rappresenta la zona a massima probabilità di invasione da flussi piroclastici da eruzioni di grande taglia, che deve quindi essere evacuata prima dell'eruzione;
- 2) definire un Sistema 'a semaforo', basato sui livelli progressive di crescita delle 'anomalie' (o 'fenomeni precursori', di fig.1), con colori Verde, Giallo, Arancione, Rosso;
- 3) raggiunto il livello 'Rosso', tutta la zona rossa deve essere completamente evacuata entro 72 ore.

Mentre i livelli da Verde ad Arancione sono decisi dalla Protezione Civile Nazionale, con la consulenza della 'Commissione Grandi Rischi Vulcani', ossia un pool di esperti nazionali, il passaggio dall'Arancione al Rosso viene deciso direttamente dal Capo del Governo (Premier).

È chiaro che gli attuali Piani di Emergenza si basano sull'assunzione che la previsione dell'eruzione (dichiarazione di allerta 'Rosso') sia pressoché certa o comunque corretta con alta probabilità; cosa che, come dimostrato dalla casistica globale, è assolutamente falso.

I PIANI DI EMERGENZA IN CAMPANIA

I Piani di Emergenza vulcanici in Campania rappresentano uno degli argomenti più spinosi, scientificamente, tecnicamente e politicamente, degli ultimi 35 anni. Senza volerne ripercorrere in dettaglio la storia, che inizia nel 1983-1984 con il problema, concretissimo, dell'evacuazione completa di Pozzuoli a fine 1984 a causa dell'eccezionale fenomeno di bradisisma accompagnato da intensa sismicità, possiamo sottolineare che questo argomento è diventato progressivamente più sentito dall'opinione pubblica (all'inizio abbastanza distratta e distante), fino ad assumere, negli ultimi anni, la forma di una vera e propria continua 'emergenza' mediatica, con caratteri preoccupanti a livello sociale, da 'psicosi collettiva'.

Sebbene sia molto più noto al grande pubblico, in Italia, il problema del rischio sismico, questo in realtà nel nostro Paese è un problema minore, che continua a far vittime e danni eccessivi (anche per terremoti normalmente classificati a livello internazionale di 'bassa' magnitudo) solo per la cronica mancanza

di investimenti nella 'prevenzione', che consisterebbe molto semplicemente nel consolidamento degli edifici, in particolare modo quelli storico-archeologici di grande valore ma estremamente vulnerabili, per renderli resistenti a livelli di magnitudo tutto sommato contenute (il territorio Italiano non può dar luogo a terremoti di magnitudo estreme, come in altre aree). Il vero rischio naturale che non ha eguali al Mondo, in Italia, è rappresentato dal rischio vulcanico. Il più alto rischio vulcanico al Mondo è infatti concentrato nell'area Napoletana, sia per la pericolosità delle tre aree vulcaniche che contornano Napoli (Vesuvio, Campi Flegrei, Ischia), sia per l'altissima densità di popolazione nelle zone più esposte; sicuramente le più densamente urbanizzate d'Europa. A differenza del rischio sismico, da quello vulcanico non ci si può difendere completamente consolidando infrastrutture ed edifici, ma l'unica possibilità è quella di evacuare le aree più esposte prima dell'accadimento di un'eruzione.

Attualmente, esistono (allo stadio più o meno completo, difficilmente giudicabile in maniera 'oggettiva' come si evince anche dal link precedente) Piani di Emergenza per le due aree vulcaniche principali: Vesuvio e Campi Flegrei. Ischia, sebbene vulcanicamente attiva, non è stata per ora ancora considerata. I Piani di Emergenza per Vesuvio e Campi Flegrei, sostanzialmente analoghi nelle caratteristiche principali,

prevedono 4 livelli di allerta: quiescente o 'base' (verde); con attività leggermente anomala o di 'attenzione' (giallo); con forti anomalie o di 'pre-allarme' (arancione); con forte probabilità di imminente eruzione o di 'allarme' (rosso). Allo scattare dell'allerta rossa in una delle aree, si mette in moto il Piano di Evacuazione completa della rispettiva 'zona rossa', ossia quella a maggior rischio di distruzione completa e morte di ogni essere vivente (per i 'flussi piroclastici', anche noti come 'nubi ardenti'). Le zone rosse del Vesuvio e dei Campi Flegrei (Fig. 3) contengono, rispettivamente, circa 700.000 e circa 600.000 residenti. L'evacuazione completa di una tale quantità di persone deve avvenire in 72 ore al massimo (3 giorni), in gran parte mediante trasporto stradale e comunque, a nostra conoscenza, per vie di terra. I seguenti link, al sito del Dipartimento della Protezione Civile, contengono gli elementi fondamentali dei rispettivi Piani Nazionali (che dettano le linee guida, e sono poi completati dai Piani predisposti da Regione e singoli Comuni):

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_dossier.wp?jsessionid=37DA6EDA9DBD5BE158C17FB29BCFB77E.worker3?contentId=DOS37087

http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/view_dossier.wp?contentId=DOS50555



Figura 3. Zone rosse e gialle, per il rischio vulcanico, nell'area Napoletana. Le zone rosse rappresentano le aree a maggior probabilità di invasione di flussi piroclastici, i limiti più esterni essendo raggiunti da eruzioni di maggiore potenza. Le zone gialle rappresentano invece le aree dove sono prevedibili i maggiori spessori di depositi dovuti alla ricaduta dei prodotti più leggeri nella colonna eruttiva (ceneri e pomice)

I Piani di Emergenza in questione sono dall'origine (il primo Piano Vesuvio data dal 1995) oggetto di numerose critiche, da parte di cittadini, di forze politiche, dei media, per la loro ipotetica 'inattuabilità', alla luce di varie difficoltà ipotizzate: intasamento rete viaria, indisciplinazione dei cittadini, impreparazione dei Comuni e/o delle autorità e delle unità di soccorso preposte, ecc. ecc. Fino ad ipotizzare addirittura, talvolta nel 'folklore' popolare, che in realtà le autorità non darebbero comunque mai l'allarme (che avvia l'evacuazione) perché la paura e la concitazione causerebbero più vittime dell'eruzione stessa. Per questi motivi, questo argomento ha oggi un valore enorme sotto molti punti di vista: economico, per l'impatto gigantesco sull'economia Italiana che avrebbe un esodo di massa, unitamente all'abbandono di molte aree a rischio; sociale, perché la sfiducia nelle Istituzioni generata dai molteplici dubbi sulla efficacia dei Piani attuali genera ormai vere e proprie 'psicosi' collettive e stati d'ansia, specialmente nell'area flegrea dove, dal 2012, è scattato il primo livello di allerta, 'Giallo'; politico, perché appunto l'efficacia di un'operazione gigantesca, di tale impatto, è fortemente condizionata dalla fiducia e dall'autorevolezza che le forze di governo (e tutte le Istituzioni) ispirano nella popolazione. E' dunque, sicuramente, un problema gigantesco ed estremamente complesso, che però spiegato bene a livello Europeo potrebbe essere un'occasione per l'ottenimento di importanti risorse comunitarie, e dunque l'occasione per la soluzione, in termini anche economicamente sostenibili se non addirittura vantaggiosi, di problemi endemici e consolidati di sovrappopolazione, degrado urbano ed in ultima analisi di sviluppo del Mezzogiorno.

LINEE GUIDA PER UNA PROPOSTA INNOVATIVA DI GESTIONE EFFICACE DELL'EMERGENZA VULCANICA

Il rischio vulcanico in Campania interessa circa 3 milioni di persone, localizzate entro 15-20 km circa da una possibile bocca eruttiva. I tre centri vulcanici Campani, i cui processi eruttivi, per esperienza pregressa e per mancanza di evidenze teoriche contrarie, risultano indipendenti tra loro, sono: Vesuvio, Campi Flegrei ed Ischia. La presente proposta non prevede modifiche sostanziali alle zone 'rosse' (ossia quelle a maggior rischio di invasione da flussi

piroclastici), né alle zone 'gialle' (ossia quelle a maggior rischio di ricaduta e accumulo di cenere e prodotti leggeri) già definite per Vesuvio e Campi Flegrei. La zona rossa di Ischia, non ancora definita ufficialmente, possiamo ragionevolmente assumere che coinvolgerà tutta e sola l'isola. La differenza principale di questa proposta consiste nella programmazione dettagliata preventiva della possibile evacuazione; e inoltre nella possibilità di attuare evacuazioni 'limitate' (evacuazione progressiva, come attuata ad esempio in Giappone) che in presenza di segnali premonitori sempre più evidenti possa coinvolgere 'progressivamente' l'intera area rossa. Un altro punto su cui riflettere è la possibilità di utilizzare, in caso di evacuazione, anche (e soprattutto) le vie di mare, che oggi sembrano completamente escluse pur essendo in teoria le meno critiche rispetto ai problemi di 'traffico' che evidentemente affliggono il trasporto stradale; un Piano di Emergenza di Ischia, in ogni caso, potrebbe ovviamente includere solo l'evacuazione via mare. In base al Piano attuale, in caso di allerta del quarto livello (allerta 'Rossa') è prevista l'evacuazione entro 72 ore di tutti i cittadini che risiedono entro i confini della zona rossa della rispettiva area vulcanica. La fase di evacuazione, nell'attuale versione del piano, dà uno spazio limitato all'autonoma risistemazione dei residenti; che in ogni caso è decisa e determinata nella fase di pre-allarme o nella fase di allarme. La proposta attuale di revisione prevede invece che l'intero processo di evacuazione e risistemazione, di tutti i residenti, sia pre-determinato e completamente dettagliato, indipendentemente dallo stato di allerta del vulcano. In altre parole, si prevede che per tutti i residenti delle zone rosse siano preventivamente individuate le aree (entro i confini nazionali) in cui debbano essere ri-sistemati in caso di allarme rosso. In tale contesto inoltre, diversamente da quanto prevede la versione attuale del Piano di Emergenza, la fase di evacuazione e ri-sistemazione non viene intesa come fine a sé stessa, e quindi esaurita con la salvaguardia dell'incolumità dei residenti e con il loro trasferimento nelle nuove aree; viene invece dettagliato anche il reinserimento sociale e lavorativo completo dei residenti nell'area di nuovo insediamento. Questo passaggio è stato finora trascurato, ma è enormemente importante perché, come esporremo molto sinteticamente, la fase di ri-sistemazione non potrà essere 'breve', per sua natura, ma

durerà per lo meno anni, se non decenni. Infatti, già la dichiarazione dell'allarme rosso implica una enorme responsabilità da parte del decisore, che corrisponde in pratica ad un rischio eruzione non più accettabile date le vite in gioco. Purtroppo, però, anche nella migliore delle ipotesi e con 'precursori' apparentemente molto chiari, la probabilità di 'falso allarme' (ossia la probabilità che l'eruzione non avvenga) è comunque molto alta; normalmente, sarà anche molto più alta della probabilità di eruzione stessa (perché, appunto, dato l'enorme valore di vite umane in gioco, anche probabilità di eruzione relativamente basse possono essere assolutamente inaccettabili). In queste condizioni, distinguiamo i due casi possibili: 1) l'eruzione non avviene entro tempi 'brevi'; 2) l'eruzione avviene. Nell'ipotesi 1), è chiaro che nel momento in cui si è dato un allarme rosso, con tutte le responsabilità di spostare centinaia di migliaia di persone, e data l'alta incertezza nella conoscenza precisa dei fenomeni vulcanici, anche dopo mesi di attesa (se non dopo anni) sarà pressoché impossibile avere la certezza che il pericolo di un'eruzione imminente sia effettivamente scongiurato; e quindi prendersi la responsabilità di un contro-esodo che riporterebbe la situazione abitativa ad altissimo rischio come in precedenza. Nell'ipotesi 2), d'altra parte, anche se l'eruzione avvenisse entro tempi brevissimi (giorni) dall'evacuazione, e durasse per un periodo altrettanto breve, si porrebbero comunque due condizioni parimenti ostative alla ri-urbanizzazione delle aree evacuate: la prima, ovvia, è che dipendendo dalle condizioni eruttive alcune aree, in percentuale probabilmente significativa di tutto il territorio, sarebbero devastate dall'eruzione e quindi non ri-urbanizzabili in tempi brevi (almeno decenni). La seconda condizione ostativa, anche in presenza di un'eruzione di durata limitata, sarebbe comunque legata alla considerazione che non si potrà essere completamente certi che la fase eruttiva si sia esaurita dopo la singola eruzione di breve durata. Quest'ultima considerazione è tanto più vera in quanto, per vulcani quiescenti da decenni o da molti secoli come quelli Campani, una nuova eruzione implicherebbe comunque mutate condizioni di attività del vulcano; che renderebbero estremamente meno prevedibile (in quanto in condizioni diverse da quelle osservate in epoca moderna) l'evoluzione futura del vulcano. Da tutte queste considerazioni, basate su elementi scientifico-vulcanologici in

massima parte, e per il resto su un ovvio buon senso che impone atteggiamenti estremamente 'cautelativi', discende necessariamente che, a fronte di un'evacuazione di massa, i tempi di permanenza fuori dai centri di origine dei residenti evacuati saranno, realisticamente, almeno dell'ordine di molti anni o decenni. E' chiaro che con tali ordini di grandezza temporali, non è pensabile pensare di 'parcheggiare' semplicemente 700.000 o 600.000 persone senza che esse siano normalmente inserite in attività lavorative, ricreative, formative (almeno per i minori) e possano accedere a servizi adeguati per ogni necessità. La soluzione deve essere quindi la previsione del completo reinserimento degli individui e/o delle famiglie nella nuova sistemazione, in previsione di un periodo di permanenza molto lungo o anche definitivo.

Una tale soluzione richiede ovviamente un procedimento molto complesso, di cui cerchiamo nel seguito di descrivere schematicamente un possibile metodo attuativo. Il metodo proposto, che a noi sembra il più razionale, richiede comunque l'incrocio di un gran numero di dati, da incrociare allo scopo di ottimizzare l'associazione tra i nuclei familiari e le nuove aree di residenza. Tale metodo richiede quindi algoritmi di calcolo (ottimizzazione) molto sofisticati, che identifichiamo nelle tecniche che vanno sotto il nome di 'reti neurali'. Senza entrare nei dettagli (qualche elemento di approfondimento sarà dato comunque in un prossimo paragrafo) sottolineiamo comunque che l'elaborazione di centinaia di migliaia di nuclei familiari è un problema formidabile, anche per le più sofisticate tecniche; proponiamo quindi che sia effettuata prioritariamente un'analisi di fattibilità con insiemi più limitati (dell'ordine delle migliaia o al massimo decine di migliaia), per trovare le soluzioni migliori per la programmazione definitiva con grandi numeri.

Per descrivere sommariamente il procedimento, ogni cittadino delle zone rosse dovrebbe segnalare al proprio Comune, che poi trasferirà le informazioni in un data-base nazionale, il Comune in cui intenderebbe trasferirsi in caso di evacuazione, specificandone le motivazioni precise (ad esempio: possesso di seconda casa, legami familiari o sociali, opportunità lavorative, ecc.); o, in alternativa, fornire una serie di preferenze più o meno dettagliate (esempio: Regione, Comune, zona montana o marina, ecc.). In base alle specifiche

ed alle preferenze espresse, le autorità Nazionali (con la creazione ad esempio di un apposito Ufficio di Coordinamento), insieme alle Regioni ed ai Comuni interessati, dovrebbero preventivamente pianificare la risistemazione completa dei residenti delle zone rosse in caso di evacuazione; prevedendo cioè anche il re-inserimento lavorativo (in caso di Istituzioni pubbliche attraverso un automatico trasferimento; in caso di aziende a scala nazionale mediante trasferimento e/o opportuni incentivi, ecc.) e sociale completo, in modo da rendere comunque funzionale la risistemazione nelle singole aree interessate. Oltre alla ovvia efficienza di una tale programmazione (che consentirebbe un esodo perfettamente programmato con minimi tempi 'inerti' e con minimi costi a carico della collettività), questa soluzione ha anche molti chiari ed ovvii vantaggi da un punto di vista della consapevolezza e dell'informazione preventiva. Infatti, prima di tutto si renderebbero automaticamente consapevoli i cittadini di tutto il processo di evacuazione compresa la destinazione e la vita futura; ma nello stesso tempo i residenti delle zone rosse acquisterebbero un'automatica consapevolezza di vivere in un territorio ed in una condizione di maggiore 'vulnerabilità'; nonché di maggiore attenzione alla sicurezza ed alla programmazione; ed in ultima analisi di maggiore 'sorveglianza' (i dati per la programmazione del reinserimento sociale dovrebbero essere sempre disponibili ed opportunamente aggiornati) e quindi minore 'autonomia'. Queste condizioni sono ovviamente necessarie in un territorio ad alto rischio, ed i cittadini che scelgano di risiedere (ex novo o in continuità) in queste aree devono chiaramente percepire i vantaggi, i rischi e le limitazioni di questa situazione. Una volta programmata nel dettaglio, in maniera preventiva, una eventuale evacuazione, sarà anche molto più semplice procedere, sempre preventivamente, ad un progressivo decongestionamento abitativo delle zone rosse, e ad un cambiamento progressivo dell'urbanizzazione nell'area da 'residenziale' a 'ricettivo-turistica' o comunque destinata ad altre attività. Infatti, prima di tutto la stessa popolazione, resa completamente edotta dell'eventualità di essere de-localizzata, ed avendo già pianificato la possibile sistemazione futura, potrà con buona probabilità decidere di anticipare, volontariamente, questo suo nuovo possibile 'futuro', anticipandolo col minimo rischio. Inoltre, sarà comunque molto più semplice in-

centivare la 'ri-sistemazione' volontaria (ad esempio, ma solo per portarne uno, detassando in tutto o in parte, per alcuni anni, le attività lavorative nella nuova sistemazione). Altra importantissima possibilità che una tale nuova visione del Piano di Emergenza apre è la possibilità di considerare una possibile evacuazione, che ha comunque un'alta probabilità di essere causata da un 'falso allarme' (e quindi nell'ottica attuale un 'errore', con tutte le ripercussioni negative del caso), una misura comunque preventiva di mitigazione del rischio vulcanico; in quanto, anche in caso di falso allarme, sarà un'occasione per rendere definitiva la ri-localizzazione della maggior parte degli ex-residenti. Perché, dopo un tempo più o meno lungo di re-inserimento nella nuova situazione, gran parte delle persone troverà molto più comodo e sicuro rendere tale nuova condizione definitiva.

In questa forma, inoltre, la programmazione dell'emergenza si presta anche a possibili soluzioni di maggiore flessibilità per l'evacuazione, rispetto all'evacuazione 'totale' oggi prefigurata: ad esempio, si possono facilmente considerare piani di 'evacuazione progressiva' che coinvolgono cioè in primis le parti più esposte, e poi via via quelle più periferiche, della zona rossa, a seconda del progressivo infittimento dei fenomeni precursori (l'esempio più semplice è quello di evacuare la popolazione entro un raggio, intorno alla zona eruttiva presunta, via via crescente man mano che aumentano e divengono più chiari i fenomeni precursori).

Come commento finale, sembra ovvio che tale nuova ottica del Piano di Emergenza possa essere molto più facilmente coniugata con azioni di messa in sicurezza delle zone rosse (con consolidamento degli edifici, decongestionamento urbano, ecc.) e di incentivazione del cambiamento di uso degli immobili: da residenziale a ricettivo-turistico, o per altri tipi di attività.

E' chiaro che la programmazione dettagliata dell'evacuazione, con il completo reinserimento sociale e lavorativo di molte centinaia di migliaia di persone, richiede uno studio dettagliato con molteplici variabili: gli individui già decisi e con forti motivazioni; gli individui meno decisi o completamente indifferenti alla sistemazione futura; l'individuazione delle aree con maggiori opportunità di reinserimento; la programmazione e dimensionamento del reinserimento lavorativo e scolastico; l'aggiornamento continuo sulla base dei mutamenti nel-

la popolazione residente; ecc. Ottimizzare un Piano con molteplici variabili richiede l'utilizzo di sistemi informativi e di elaborazione dei dati estremamente avanzati; per questo, come già accennato, il problema può essere risolto con l'applicazione di algoritmi tipo 'reti neurali' e sistemi di Intelligenza Artificiale.

Infine, vogliamo sottolineare, come è ovvio, che questa proposta rappresenta solo una sintesi delle idee e del filo conduttore principali, che vanno poi concretamente sviluppate e possono essere dettagliate, integrate e corrette/modificate; attraverso un esame approfondito e controllato da più punti di vista e da tutti i necessari profili di esperienza e professionalità (che, nel caso di un approccio completo, deve coinvolgere vulcanologi, ingegneri, economisti, sociologi, psicologi, esperti di comunicazione, esperti di logistica, ecc.).

IL PROBLEMA DELLE 'ZONE GIALLE' (A RISCHIO RICADUTA DI CENERI E POMICI)

Un altro problema, arduo e finora poco discusso e non affrontato, è quello della protezione degli edifici delle zone a ridosso delle aree rosse, in cui è molto alto il rischio di collasso dei tetti (e quindi degli edifici) per l'accumulo di prodotti piroclastici leggeri (ceneri e pomici) trasportati dal vento anche a notevole distanza. Queste sono le zone 'gialle' delle mappe di rischio vulcanico, che includono l'intera città di Napoli, la Provincia di Napoli quasi per intero e molte aree, particolarmente a Nord e ad Est del Vesuvio, che sconfinano nelle altre province della Campania.

È noto che l'accumulo sui tetti di appena 30 cm di cenere provoca il collasso di gran parte degli edifici, mentre 50 cm di cenere rappresentano il collasso di praticamente qualunque solaio, anche i più robusti. Di fronte a questo problema, che è particolarmente drammatico in caso di eruzione dei Campi Flegrei perché, siccome i venti in quota nelle nostre aree spirano mediamente verso i settori Orientali, il centro di Napoli è esattamente la zona, sottovento, dove sono previsti i massimi spessori di piroclastiti. Al contrario, rispetto alle eruzioni del Vesuvio il centro di Napoli, essendo localizzato nella direzione opposta a quella dei venti dominanti in quota, è oggettivamente (e storicamente) molto riparata.

Il problema dell'accumulo di cenere si pone ovviamente solo per i tetti piani, che però nelle nostre aree sono la

stragrande maggioranza. La soluzione sarebbe modificare tutti gli edifici in modo che abbiano tetti spioventi. Tale soluzione è ovviamente impraticabile, mentre potrebbe essere realistico, ed in alcune zone vulcaniche del Mondo viene fatto, creare delle coperture spioventi 'montabili' per ciascun edificio delle zone gialle, da installare rapidamente in caso di eruzione (o più efficacemente nella fase di allerta 'arancione').

I RISCHI CONCATENATI (CATASTROFALI)

Il problema della numerosissima popolazione esposta al rischio vulcanico, che implica anche un notevole rischio sismico associato, può diventare ancor più critico nel caso si aggiungano altri rischi concatenati. L'esempio più attuale ed evidente è dato dalla pandemia di Covid-19. Attualmente, al 26/01/2022, nella provincia di Napoli ci sono circa 150.000 contagi attivi ufficialmente registrati, ossia in isolamento (in massima parte nei rispettivi domicili). L'intera provincia di Napoli conta circa 3.100.000 abitanti, come abbiamo visto quasi tutti localizzati in zone rosse o gialle per il rischio vulcanico; di questi, circa 1.400.000 sono localizzati in una delle due zone rosse relative al Vesuvio o ai Campi Flegrei. Statisticamente, quindi, circa la metà dei contagiati attivi, diciamo almeno 70.000 persone, sono in questa data in isolamento in una delle due zone rosse; come è noto, i contagiati ufficiali sono soltanto una frazione dei contagiati reali, che sono nella realtà almeno il doppio (contando gli asintomatici o i paucisintomatici che, in particolare se vaccinati, non hanno motivo di sottoporsi ai test). E' chiaro che un'evacuazione totale che si rendesse necessaria in un simile periodo di pandemia rappresenterebbe un evento enormemente più catastrofico (de Vries ed al., 2021), la cui probabilità è però estremamente bassa. Il problema, però, è che anche una sismicità sostenuta, come quella ad esempio già sperimentata ai Campi Flegrei durante il bradisismo degli anni '80 ($M_{max}=4.2$: Troise ed al., 2019), oppure come quella che caratterizzò l'area Vesuviana tra Ottobre 1999 e Gennaio 2000 ($M_{max}=3.7$: De Natale ed al., 2004), o magari come l'evento di Ischia del 21/08/2017 ($M=4.0$: De Natale ed al., 2019), potrebbero spingere la popolazione ad evacuare spontaneamente le proprie abitazioni, accalcanendosi nelle piazze con conseguenze molto serie, sia per la moltiplicazione dei contagi che per la stessa sicurezza delle

persone ammalate in isolamento. Se poi il livello della sismicità o comunque di altre manifestazioni generanti allarme divenisse tale da richiedere addirittura l'evacuazione delle strutture ospedaliere, il rischio diverrebbe devastante. Immaginiamo ad esempio i problemi cui andrebbero incontro i pazienti dei reparti critici: terapia intensiva (oltre 300 posti sono in zona rossa), e sub-intensiva (oltre 1600 posti di degenza ordinaria sono in zona rossa).

La considerazione di questi ulteriori problemi fa comprendere in maniera ancor più chiara quanto sia in realtà critica, e difficilmente sottovalutabile, la situazione di rischio in cui si trovano queste aree. E quanto una corretta e significativa mitigazione di tali insostenibili rischi debba essere affrontata e portata a termine nel più breve tempo possibile, in quanto non compatibile con una società evoluta.

IL PROBLEMA MATEMATICO DELL'OTTIMIZZAZIONE DELLA RI-SISTEMAZIONE DELLE POPOLAZIONI

Come citato, il problema della ri-sistemazione ottimale di tutte le popolazioni delle zone rosse, da programmare con largo anticipo ed anche indipendentemente dall'emergenza, richiede l'uso di tecniche estremamente complesse basate sugli algoritmi evolutivi basati su reti neurali ed intelligenza artificiale. E' necessario infatti incrociare i dati, estratti dai data base esistenti o da integrare, relativi a ciascun individuo (e relativa famiglia) con i dati delle aree che potrebbero ospitarlo; aree che, man mano che si popolano di nuovi individui e famiglie evacuati, modificano le proprie caratteristiche in termini di richiesta/offerta di servizi fondamentali (es. se aggiungo 2000 persone ad un centro urbano, avrò bisogno di un congruo numero aggiuntivo di medici, farmacie, insegnanti e/o edifici scolastici, ecc. Ma alcuni dei nuovi arrivati, ad esempio medici, farmacisti, ecc. possono contribuire a bilanciare la situazione). Anche con le tecniche e gli algoritmi più sofisticati, comunque, ottimizzare l'incrocio tra le esigenze di 600.000-700.000 persone con i relativi centri urbani che possono accoglierli, è un problema formidabile e fuori dalle possibilità attuali. Nonostante ciò, è possibile diminuire drasticamente le variabili in gioco considerando non più i singoli individui e le loro famiglie, ma bensì 'gruppi' di individui e famiglie 'simili' dal punto di

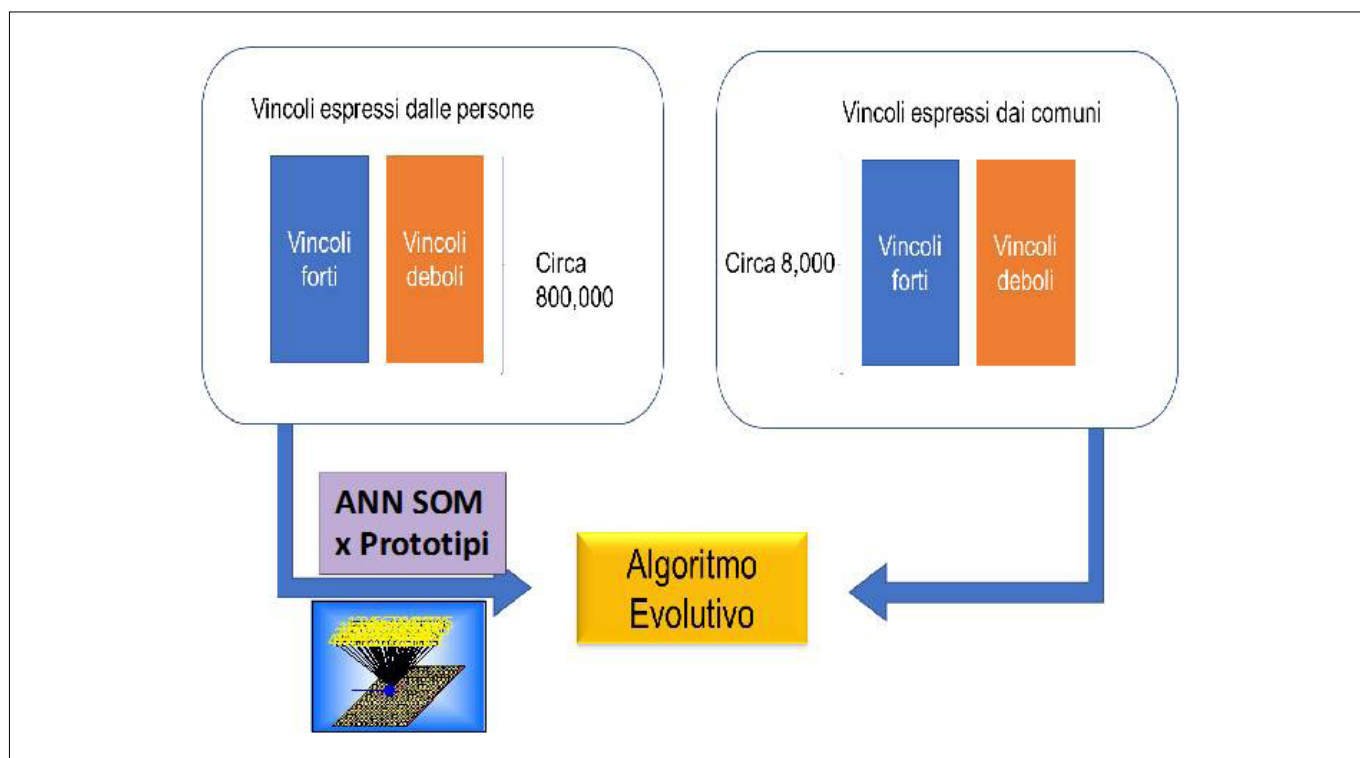


Figura 4. Schema generale per la costruzione di un algoritmo che ottimizzi la sistemazione di un gran numero di abitanti in una zona rossa (in questo schema 800.000) in un certo numero di possibili comuni Italiani (nello schema 8000). Il sistema di vincoli, per quanto riguarda le persone, può essere di tipo 'forte' (ad esempio una seconda casa, o una concreta possibilità di lavoro, in un certo comune) o 'debole' (ad esempio l'espressione di un ordine di preferenza). Anche per quanto riguarda i possibili comuni ospitanti, si può adottare un sistema di vincoli, forti o deboli. Il calcolo, in tal modo vincolato, è quindi effettuato da un algoritmo evolutivo

vista delle necessità e/o delle richieste, gruppi da identificare effettuando preliminarmente calcoli opportuni basati su tecniche di 'profiling'. In tal modo, il problema diviene risolvibile, sebbene ancora estremamente complesso, in tempi realistici. E' importante che tali tecniche vengano comunque testate, su campioni ridotti e via via più grandi, in un opportuno 'studio di fattibilità', per capire in qual modo renderle più adatte possibile a risolvere con la minima approssimazione il problema. Il criterio generale da adottare per tali algoritmi è riportato, sebbene in maniera stremamente schematica, in fig.4 (Buscema e Ruggeri, 2011; Buscema, 2013).

SUL VALORE AGGIUNTO DI UNA RAZIONALE RI-SISTEMAZIONE DELLE POPOLAZIONI DELLE ZONE ROSSE

La popolazione delle zone rosse ammonta oggi a circa 1.300.000 persone; a queste vanno aggiunte circa 70.000 abitanti dell'isola d'Ischia, quando anche l'isola sarà (verosimilmente) dichiarata zona rossa. Nel Piano di Emergenza attuale è prevista la disseminazione su tutto il territorio nazionale della popolazione della zona rossa per cui la rispettiva area vulcanica è considerata di imminente eruzione. L'evacuazione repentina di 600.000-700.000 abitanti da un'area densamente popolata ha

costi economici ingenti: intanto, da un banalissimo calcolo percentuale (circa 1% rispetto al totale della popolazione Italiana) si può già stimare il danno economico 'diretto' in almeno l'1% del PIL; a tale stima di minima bisogna aggiungere il danno economico indotto a tutta l'Economia nazionale, nonché i costi di completa assistenza della popolazione evacuata (non è infatti attualmente previsto alcun re-inserimento nell'economia e nel tessuto sociale nazionali).

Poiché il PIL annuale del nostro Paese vale circa 2.000 miliardi di euro, ed il costo di assistenza completa alle popolazioni sfollate, stimando una cifra minima di 10000-15000 € pro-capite/anno, il costo di un'evacuazione improvvisa e non programmata sarebbe di oltre 30 miliardi di euro/anno. Agli alti costi economici (verosimilmente insostenibili per tempi medio-lunghi) si aggiungerebbe l'enorme disagio sociale; la combinazione dei due fattori, ma anche il solo costo economico, costituirebbe un gravissimo problema non solo di carattere nazionale, ma su scala almeno Europea.

Viceversa, un'evacuazione programmata, razionale e soprattutto progressiva (e non repentina) potrebbe risolvere, oltre al problema enorme del rischio vulcanico nell'area Napoletana, anche un problema parimenti grave come la crisi demografica (spopolamento ed invecchiamento progressivo) di molte aree interne del Meridione d'Italia. In

quest'ottica, le mete privilegiate su cui ri-allocare la popolazione residente nelle zone rosse potrebbero essere appunto le aree interne delle stesse Regioni Meridionali, ed in misura maggiore la Campania. Come conseguenza, le zone rosse vulcaniche, comunque ad altissimo valore turistico e culturale, potrebbero essere di nuovo bilanciate in base ad un peso demografico residenziale significativamente minore, e restituite ad una loro naturale, molto maggiore vocazione turistica, culturale e di attività economiche sostenibili e ad alto valore economico.

Per incentivare il trasferimento spontaneo della popolazione delle aree a rischio vulcanico nelle aree interne a rischio demografico, è fondamentale la creazione di infrastrutture, principalmente trasporti (linee ferroviarie ad alte velocità, come ad esempio la tanto attesa Napoli-Bari, Metropolitane Regionali e collegamenti via mare con grandi navi, attraverso l'adeguamento dei Porti minori). Lungo queste linee di collegamento, l'opportuna creazione di zone economiche speciali in corrispondenza delle aree da ripopolare, costituirebbe un ulteriore incentivo ad abbandonare le aree-dormitorio sovrappopolate nelle zone rosse, trasferendosi in zone più lontane ma perfettamente collegate; consentendo il raggiungimento rapido degli stessi luoghi di lavoro (anche nelle zone rosse), oppure nuove, migliori oc-

casioni di impiego in zone economicamente privilegiate.

In conclusione, ponendo correttamente sui tavoli Comunitari la questione dell'altissimo rischio vulcanico dell'area Napoletana, la cui proporzione ed il cui valore economico sono stati finora assolutamente sottostimati, può diventare possibile un imponente trasferimento di risorse dall'Europa al Mezzogiorno d'Italia, per risolvere problemi endemici e mai sinora seriamente affrontati come la creazione di infrastrutture degne di un Paese moderno e l'istituzione di opportuni incentivi allo sviluppo, che soli possono creare ed una crescita economica adeguata al resto d'Italia ed ai Paesi Europei più sviluppati. In quest'ottica, anche un problema gravissimo come il rischio vulcanico, affrontato seriamente e nel modo migliore può costituire un volano di grande sviluppo per il Paese.

L'OPPORTUNITÀ DEL PNRR

Il PNRR è l'occasione, probabilmente irripetibile, per risolvere questo enorme problema che altrimenti potrebbe avere drammatiche conseguenze future. Nell'ambito del PNRR, ad esempio, dovrebbe verosimilmente essere finalmente realizzata una rete efficiente di trasporti veloci nel Mezzogiorno, sia interregionale principalmente sull'asse Tirreno-Adriatico (ad esempio, l'alta velocità Napoli-Bari), sia a livello regionale, sul modello della RER parigina (ma anche, in piccolo, la Circumvesuviana e la Circumflegrea, che potrebbero e dovrebbero essere potenziate ed estese). Inoltre, uno dei caposaldi principali del PNRR, specialmente al Sud, dovrebbe essere la creazione di Zone ad Economia Speciale (o ZES). Con questi strumenti, uniti ad un opportuno canale di finanziamento dedicato per la ristrutturazione urbana delle zone rosse e delle aree limitrofe, il problema della mitigazione del rischio vulcanico nell'area Napoletana può essere affrontato ed efficacemente risolto. Tale soluzione potrebbe inoltre legarsi alla soluzione di un altro spinoso problema, che attanaglia e minaccia il futuro del Mezzogiorno: lo spopolamento delle aree interne.

Infatti, l'unica reale alternativa per mitigare l'enorme problema del rischio vulcanico è quella di organizzare preventivamente una 'seconda vita' delle popolazioni delle zone rosse, una volta evacuate, contemporaneamente spingendo buona parte di esse ad intraprendere tale nuova condizione, spostando la propria residenza dalle zone rosse ad

altre aree, ben prima di ogni reale allerta di eruzione imminente. L'obiettivo deve essere infatti quello di diminuire drasticamente la popolazione residente in queste aree, in modo da rendere realmente fattibile e sostenibile un'eventuale evacuazione, che dev'essere quindi dettagliatamente e preventivamente pianificata; ma nel contempo non pregiudicando, anzi incrementando l'economia di queste aree, che sono da sempre tra le più ambite al Mondo per le bellezze naturali, la cultura millenaria ed i vantaggi dati dalla natura vulcanica.

In pratica, in queste aree si deve poter lavorare e produrre; bisogna incrementare il turismo, l'industria sostenibile ed il terziario; scoraggiando fortemente, attraverso incentivi (ad uscire) e disincentivi (ad entrare) soltanto la residenzialità. Tutto questo può avvenire se, come già avviene in molte aree metropolitane del Mondo, per motivi diversi, la popolazione può essere spostata fuori da queste aree come residenza, ma potendole raggiungere in tempi brevi per poter svolgere le proprie attività (ed i propri svaghi nel tempo libero). Il modello dev'essere quello, già ampiamente diffuso anche in zone che non hanno alcun rischio, perché offre comunque grandi vantaggi, di molte grandi aree metropolitane, come Parigi, in cui la popolazione risiede prevalentemente in agglomerati urbani limitrofi, collegati con la città da linee Metropolitane regionali veloci.

Questo gran numero di popolazione, se razionalmente ri-allocata, su base essenzialmente volontaria ed incentivata, al di fuori delle zone rosse, potrebbe costituire un serbatoio importante anche e soprattutto per ripopolare e rivitalizzare le aree in forte calo demografico, a rischio di spopolamento. Anche in questo caso, ovviamente, le opzioni più efficaci sarebbero rappresentate dalla opportuna creazione di zone economicamente privilegiate (le ZES, appunto) e della creazione di un sistema di trasporti ed infrastrutture efficienti, per collegare in breve tempo le zone interne della Campania e di altre regioni del Mezzogiorno alle aree costiere più a rischio. La ri-localizzazione in tali aree potrebbe seguire contemporaneamente due direttrici: la prima, quella di rivitalizzare specificamente l'economia di queste aree (e appunto il modello ZES è focalizzato su questa necessità); la seconda, quella di costituire un'area residenziale più sicura per una parte della popolazione che potrebbe comunque (anche utilizzando le nuove forme di lavoro flessibile) conti-

nuare a svolgere le proprie attività lavorative a favore delle zone rosse. In tutti i casi, la centralità dell'area metropolitana costiera (e della città di Napoli in particolare: sia per attività lavorative che di svago) dovrebbe essere assicurata da trasporti regionali (o anche interregionali) veloci ed efficienti. Un tale meccanismo, una volta innescato e ben rodato, potrebbe inoltre essere parzialmente esteso ai circa 1.500.000 di abitanti che risiedono nelle cosiddette 'zone gialle', ossia a forte rischio vulcanico per la ricaduta di ceneri. In conclusione, la ri-allocazione di circa 500.000-1.000.000 di abitanti, con relativa ri-sistemazione urbanistica ed economica delle zone rosse (prima di tutto con il consolidamento degli edifici, la loro parziale riconversione in strutture ricettive e una più generale ripianificazione urbana), e con la costruzione di una rete di trasporti veloci ed infrastrutture efficienti, sarebbe di per sé una eccezionale occasione di crescita economica e sociale, che risolverebbe molti altri problemi cruciali per il Mezzogiorno.

CONCLUSIONI

Risulta in conclusione vantaggioso, per una maggiore chiarezza, riassumere qui i punti principali discussi da questo lavoro, per evidenziare le azioni necessarie ad una efficace mitigazione dell'estremo rischio vulcanico dell'area Napoletana:

1. Tutta l'area Napoletana, compresa tra i vulcani Vesuvio, Campi Flegrei ed Ischia, è ad altissimo rischio vulcanico (circa 3 milioni di persone risiedono entro 20 km da un cratere vulcanico);
2. I Piani di Emergenza attuali, elaborati per Vesuvio e Campi Flegrei, prevedono, in caso di segnali di eruzione imminente, l'evacuazione della zona rossa di competenza, che contiene rispettivamente circa 700.000 abitanti (Vesuvio) e 600.000 (Campi Flegrei);
3. La dichiarazione di allerta rossa (evacuazione) è comunque possibile solo attraverso metodi empirici, con alta probabilità di falso allarme e con probabilità non nulla di mancato allarme;
4. Attualmente, i Piani di Emergenza terminano con l'evacuazione della popolazione al di fuori dalla zona rossa, e prevedono, per ogni comune, la ri-sistemazione in una determinata Regione Italiana; la popolazione evacuata viene quindi diffusa su tutto il territorio nazionale;

5. In base a semplici considerazioni di tipo vulcanologico, la popolazione evacuata non potrà tornare nelle aree evacuate per molti anni o decenni (forse mai);
6. Così come sono oggi definiti i Piani di evacuazione, 600.000-700.000 persone sarebbero allocate, su tutto il territorio nazionale, in modo provvisorio, scarsamente definito e poste a totale carico dello Stato;
7. Oltre al danno economico diretto dello spopolamento improvviso di un'area con circa l'1% della popolazione Italiana (grossolanamente 1% di PIL di danno), i danni economici indiretti più il costo dell'assistenza, completamente a carico dello Stato, comporterebbero un costo totale stimabile in almeno 30 miliardi di euro/anno.
8. Il costo totale economico di un'evacuazione sarebbe quindi insostenibile per una durata realistica dell'evacuazione, e porrebbe notevoli problemi non solo all'Italia ma all'intera economia Europea. Il costo sociale sarebbe anch'esso gigantesco e verosimilmente insostenibile;
9. Per questi motivi, l'unica soluzione razionale per la mitigazione dell'estremo rischio vulcanico in queste aree è una pianificazione accurata, preventiva, della ri-sistemazione delle popolazioni delle zone rosse, in cui si preveda la ri-collocazione residenziale, lavorativa, sociale e con i relativi servizi (scuole, svago, assistenza sanitaria, ecc.); in pratica, è necessario predisporre una 'seconda vita' per le popolazioni in zona rossa, da attuare in caso di evacuazione;
10. La pianificazione accurata della possibile evacuazione, accompagnata da opportuni incentivi ad abbandonare anche prima di un'emergenza le zone rosse, e disincentivi a chi vuole entrarvi provenendo da fuori, permetterebbe di diradare preventivamente le aree rosse e nel contempo di rendere fattibile/più semplice l'evacuazione della popolazione rimasta;
11. L'obiettivo prioritario dev'essere diminuire la densità di popolazione residenziale nelle zone rosse, orientandole maggiormente verso attività turistiche, culturali, di new economy o comunque compatibili con il rischio vulcanico;
12. La ri-allocazione delle popolazioni in zone rosse, piuttosto che risultare diffusa su tutto il territorio nazionale, dovrebbe privilegiare le aree in crisi demografica del Mezzogiorno, ed in particolare le aree interne a minaccia di spopolamento;
13. La ri-sistemazione, progressiva piuttosto che in emergenza tramite opportuni incentivi, delle popolazioni delle zone rosse nelle aree in crisi demografica delle zone interne del Mezzogiorno, potrebbe risolvere contemporaneamente due gravissimi problemi economici e sociali (con risvolti di rischio per la stessa incolumità delle popolazioni) per il Mezzogiorno;
14. Un'azione fondamentale, parallela alla diminuzione della densità abitativa residenziale, dev'essere una profonda e razionale ri-sistemazione urbanistica, in modo tale da aumentare significativamente la resistenza e la resilienza del territorio, e contemporaneamente rendere più semplici ed efficienti le operazioni in emergenza durante una possibile evacuazione di massa;
15. La proposta prevede l'utilizzo congiunto di una corretta programmazione, della realizzazione di una rete efficiente di infrastrutture (principalmente di trasporti pubblici come linee ferroviarie veloci, metropolitane regionali e collegamenti via mare con l'adeguamento dei porti) e la creazione di zone economiche speciali nelle aree interne a rischio di spopolamento.
16. Il PNRR rappresenta un'occasione unica, forse irripetibile, per risolvere questo spinosissimo problema. E' infatti chiaro che, se la sua soluzione non sarà programmata per tempo, il problema del rischio in quest'area sarà certamente foriero di grandi sconvolgimenti economici e sociali. Al contrario, le metodologie di soluzione elencate permetterebbero di incanalare ingenti investimenti sulle infrastrutture, le aree urbane ed in generale l'economia del Mezzogiorno, trasformando di fatto questo grande problema in una risorsa, capace di mitigare o risolvere molti problemi endemici che frenano lo sviluppo del Sud.

BIBLIOGRAFIA

- BUSCEMA M., RUGGIERI M. (2011), *Advanced Networks, Algorithms and Modeling for Earthquake Prediction*, River Publishers (Eds).
- BUSCEMA M. (2013), *The General Philosophy of Artificial Adaptive Systems, in Intelligent Data Mining in Law Enforcement Analytics*, Ch. 1 Buscema PM & Tastle W.J. (Eds), Springer.

- Consensus Study Report: Volcanic Eruptions and Their Repose, Unrest, Precursors, and Timing* (2017). The National Academy Press, 134 pp., <https://doi.org/10.17226/24650>, 2017.
- DE NATALE, G., KUZNETZOV, I., KRONROD, T., PERESAN, A., SARAÒ, A., TROISE, C., PANZA, G.F. (2004), *Three Decades of Seismic Activity at Mt. Vesuvius: 1972–2000*. *Pure Appl. Geophys.* 161, 123–144, <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2430-0>, 2004.
- DE NATALE, G., PETRAZZUOLI, S., ROMANELLI, F., TROISE, C., VACCARI, F., SOMMA, R., PERESAN, A., PANZA, G.F. (2019), *Seismic risk mitigation at Ischia island (Naples, Southern Italy): an innovative approach to mitigate catastrophic scenarios*. *Eng. Geol.* 261:105285. doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105285.
- DE NATALE, G., TROISE, C., AND SOMMA, R. (2020), *Invited Perspectives: The Volcanoes of Naples: How Can the Highest Volcanic Risk in the World Be Effectively Mitigated*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20, 2037–2053. doi:10.5194/nhess-20-2037-2020.
- DE VRIES, M.V.W., RAMBABU, L. (2021), *The impact of natural disasters on the spread of COVID-19: a geospatial, agent-based epidemiology model*. *Theor Biol Med Model* 18, 20. <https://doi.org/10.1186/s12976-021-00151-0>.
- DIPARTIMENTO DI PROTEZIONE CIVILE NAZIONALE: GAZZETTA UFFICIALE, 75 DEL 31 MARZO 2015, p. 9, available at: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2015-03-31&atto.codiceRedazionale=15A02488&elenco30giorni=false (last access: 20 July 2020).
- KILBURN, C. R. J. (2012), *Precursory deformation and fracture before brittle rock failure and potential application to volcanic unrest*, *J. Geophys. Res.*, 117, B02211, <https://doi.org/10.1029/2011JB008703>.
- KILBURN, C. R. J., DE NATALE, G., AND CARLINO S. (2017), *Progressive approach to eruption at Campi Flegrei caldera in Southern Italy*, *Nat. Commun.*, 8, 15312, <https://doi.org/10.1038/ncomms15312>.
- ROBERTSON, R. M. AND KILBURN, C.R. J. (2016), *Deformation regime and long-term precursors to eruption at large calderas: Rabaul, Papua New Guinea*, *Earth Planet. Sc. Lett.*, 438, 86–94.
- TROISE C., DE NATALE G., SCHIAVONE R., SOMMA R., MORETTI R. (2019), *The Campi Flegrei Caldera unrest: discriminating magma intrusions from hydrothermal effects and implications for possible evolution*, *Earth-Science Reviews*, 188, 108–122, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.11.007>.
- WINSON, A. E. G., COSTA, F., NEWHALL, C. G., AND WOO, G. (2014), *An analysis of the issuance of volcanic alert levels during volcanic crises*, *J Appl. Volcanol.* 3, 2–12, <https://doi.org/10.1186/s13617-014-0014-6>.
- STEFANSSON, R. (2011), *Advances in Earthquake Prediction*, Research and Risk Mitigation, Springer-PRAXIS, Berlin, Germany, 271 pp.

La scala ESI-07 (Environmental Seismic Intensity): uno strumento per la catalogazione e l'analisi degli effetti ambientali sismoindotti

The ESI-07 (Environmental Seismic Intensity) scale: a tool for analyzing Earthquake Environmental Effects

Parole chiave: terremoto; scala ESI-07; macrosismica
Key words: Earthquake; ESI-07 scale; macroseismology

Maria Francesca Ferrario¹, Franz A. Livio¹, Alessandro Maria Michetti^{1,2}, Marco Pizzi¹, Sabina Porfido^{2,3}

¹ Università dell'Insubria, Como, Italy

² Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli Osservatorio Vesuviano, Italy

³ CNR - I.S.A., Avellino, Italy

E-mail: francesca.ferrario@uninsubria.it

INTRODUZIONE

I terremoti di magnitudo superiore a circa 5.5, e nelle aree vulcaniche anche quelli con magnitudo superiore a 4 (Nappi *et al.*, 2021; Tringali *et al.*, 2022), inducono generalmente consistenti effetti ambientali, che concorrono all'impatto sulla società e sulle comunità locali, sia in termini di perdite economiche che di vite umane, con un peso sempre maggiore all'aumentare della magnitudo. Emblematico il caso del sisma di Tohoku del 2011 (Mw 9.2), nel quale la maggior parte delle vittime e dei danni sono stati causati dallo tsunami successivo al terremoto.

Le scale di intensità macrosismica valutano gli effetti dei terremoti sulle

persone, sull'ambiente antropico (oggetti, edifici e infrastrutture) e sull'ambiente naturale. Le scale di intensità più comunemente usate in Italia sono la scala MCS (Mercalli-Cancani-Sieberg) e la scala EMS (*European Macroseismic Scale*). Queste scale, e in particolare la EMS, pongono l'accento principalmente sugli effetti sulle costruzioni, mettendo in secondo piano gli effetti sull'ambiente naturale, che vengono considerati come intrinsecamente poco attendibili. Negli ultimi decenni la capacità di identificare e misurare in modo consistente gli effetti ambientali è notevolmente cresciuta, portando nel 2007 all'introduzione della scala ESI-07 (*En-*

vironmental Seismic Intensity scale; Michetti *et al.*, 2004, 2007). Questa è una scala di intensità basata esclusivamente sugli effetti sull'ambiente naturale ed è stata sviluppata nell'ambito delle attività dell'INQUA - *International Union for Quaternary Research*. La scala ESI-07 è organizzata secondo dodici gradi, analogamente a buona parte delle altre scale macrosismiche; l'attribuzione del grado di intensità si basa sulle dimensioni e l'entità delle varie tipologie di effetti.

In questo contributo vengono introdotte le caratteristiche della scala ESI-07, presentando esempi relativi ai diversi effetti ambientali e le sue modalità di applicazione e prodotti derivati (e.g.,

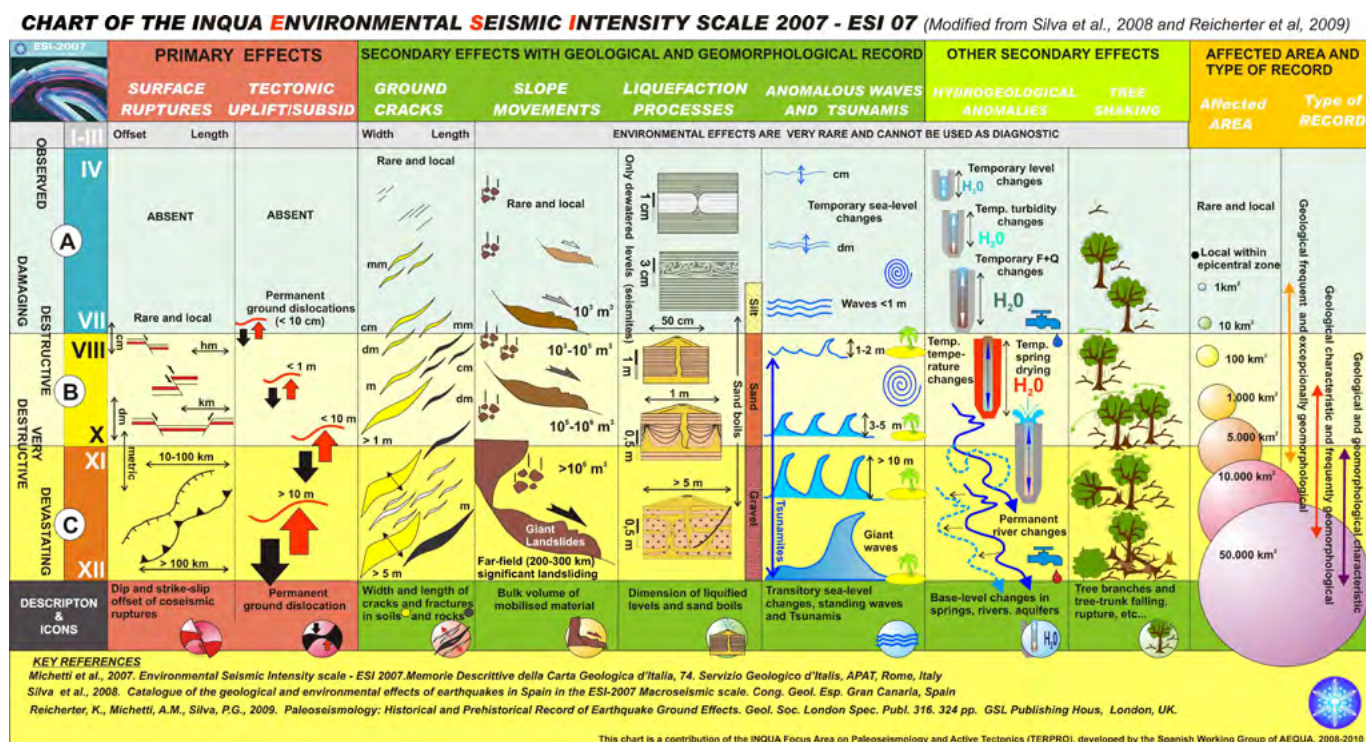


Figura 1. Infografica che riassume le dimensioni dei diversi effetti ambientali (primari e secondari) usate per attribuire un grado di intensità ESI-07. L'immagine è stata realizzata nell'ambito delle attività INQUA Terpro su paleosismologia e tettonica attiva, ed è disponibile a <http://tierra.rediris.es/aequa/paleoingua.html>

carta delle isosisme). Il testo è disponibile anche online, in formato di *Story-map*, accessibile da <https://storymaps.arcgis.com/stories/8d80c5db7a5049279a7557057ce6e199>.

GLI EFFETTI AMBIENTALI

Gli effetti ambientali cosismici vengono distinti in primari e secondari (Michetti *et al.*, 2007; Serva *et al.*, 2016). Gli effetti primari sono fagliazione superficiale e deformazione permanente della superficie topografica e sono strettamente legati alla sorgente sismica. Gli effetti secondari sono principalmente legati allo scuotimento sismico, e comprendono fenomeni quali frane, liquefazioni, tsunami e anomalie idrogeologiche.

La Fig. 1 presenta uno schema delle diverse categorie di effetti ambientali e le dimensioni associate a ciascuno grado di intensità. Di seguito diamo una breve descrizione di alcuni esempi riconducibili alle diverse categorie rappresentate nello schema.

Gli effetti ambientali direttamente causati dal movimento della faglia sismogenetica e dalla deformazione crostale da essa indotta si definiscono come primari. Tra questi il più esemplificativo è la fagliazione superficiale.

La Fig. 2 mostra un esempio di fagliazione superficiale cosismica, osservata dopo il terremoto del 30 ottobre 2016 in Italia Centrale. La fagliazione primaria rappresenta la diretta espressione in superficie del movimento lungo il piano di faglia in profondità e può essere condizionata da numerosi fattori di carattere geologico e strutturale (e.g., proprietà meccaniche dei materiali, geometria e cinematica della faglia, eventuale presenza di complessità strutturali).

Il movimento profondo della faglia sismogenetica causa comunemente anche una deformazione crostale permanente su scala chilometrica. La Fig. 3 rappresenta la deformazione del suolo causata da un terremoto di Mw 7.5 avvenuto nel 2018 in Papua Nuova Guinea e osservata tramite interferometria Radar (InSAR). Il confronto delle differenze di fase tra prodotti satellitari acquisiti prima e dopo il sisma permette di identificare i movimenti della superficie topografica con risoluzione centimetrica su aree di centinaia di chilometri quadrati.

Agli effetti primari indotti dalla fagliazione crostale, si accompagnano anche effetti secondari i.e., indotti dal passaggio delle onde sismiche o dalla risposta passiva dell'ambiente fisico alla



Figura 2. Esempio di fagliazione superficiale relativa al terremoto del 30 ottobre 2016 in Centro Italia: in primo piano un piano di faglia in rocce carbonatiche; la parte più chiara indica il movimento avvenuto in concomitanza con il terremoto. Foto di M.F. Ferrario

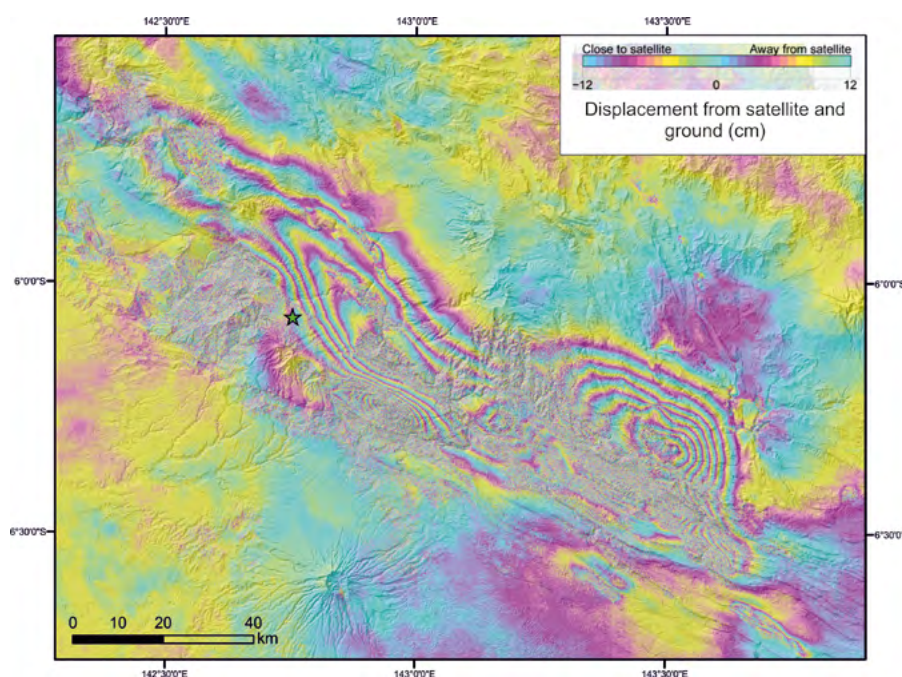


Figura 3. Esempio di deformazione permanente del suolo osservata tramite interferometria radar (InSAR); ogni ciclo di colore rappresenta 12 cm di spostamento del suolo rispetto al satellite. Dati originali disponibili a <https://www.gsi.go.jp/cais/topic180301-index-e.html>

deformazione permanente del suolo. La Fig. 4 mostra la fratturazione avvenuta in un terreno naturale a seguito del terremoto di Fleri (Sicilia), avvenuto il 26 dicembre 2018. Nel caso della fratturazione, gli elementi utili per assegnare un valore di intensità ESI-07 sono principalmente la lunghezza e il rigetto.

I movimenti franosi sono uno degli effetti ambientali secondari più comunemente causati dallo scuotimento sismico. I fattori che condizionano il

numero e la distribuzione spaziale dei movimenti franosi sono di tipo topografico (pendenza, esposizione, quota), sismologico (magnitudo e cinematica del terremoto, *ground motion*) e territoriale (litologia, distanza da corsi d'acqua o strade).

La Fig. 5 è un'immagine satellitare (©Google Earth) che mostra l'occorrenza di diffusi fenomeni franosi indotte da una sequenza sismica (magnitudo massima Mw 6.9) avvenuta nel 2018



Figura 4. Esempio di fratturazione a seguito del terremoto di Fleri (Sicilia) del 26 dicembre 2018, di magnitudo M_w 4.9. Foto di M.F. Ferrario

sull'isola di Lombok (Indonesia); nella Storymap online è possibile visualizzare in modo interattivo un'immagine satellitare precedente al terremoto (data di acquisizione: 01/08/2018) e una successiva (data di acquisizione: 12/09/2018).

Altro effetto secondario indotto dai terremoti è sicuramente la liquefazione, che avviene prevalentemente in terreni sabbiosi saturi di acqua a seguito del passaggio delle onde sismiche.

Questo fenomeno è quindi sensibilmente legato a fattori predisponenti di carattere geomorfologico: la Fig. 6 mostra liquefazione avvenuta durante la sequenza sismica dell'Emilia-Romagna del 2012; la localizzazione spaziale dei fenomeni di liquefazione è stata fortemente condizionata dalla presenza di paleovalle nel settore di pianura interessato dalla sequenza sismica.



Figura 5. Esempio di frane indotte da una sequenza sismica (magnitudo massima M_w 6.9) avvenuta nel 2018 sull'isola di Lombok (Indonesia). Immagine ©Google Earth



Figura 6. Esempio di liquefazione a seguito della sequenza sismica dell'Emilia-Romagna del maggio 2012. Foto di M.F. Ferrario.

PERCHÉ LA SCALA ESI-07?

La scala ESI-07 non intende sostituire le altre scale di intensità, ma piuttosto affiancarle al fine di ottenere un quadro più esaustivo degli effetti complessivi di un terremoto, corroborando i risultati ottenuti con le scale MCS o EMS, o eventualmente sottolineando delle differenze tra ambiente antropico e naturale. La scala ESI-07 risulta particolarmente utile nei seguenti casi:

- per i gradi di intensità più elevati (i.e., Intensità > X), dove gli effetti su edifici e infrastrutture vanno incontro a saturazione; al contrario, gli effetti ambientali non subiscono tale limitazione;

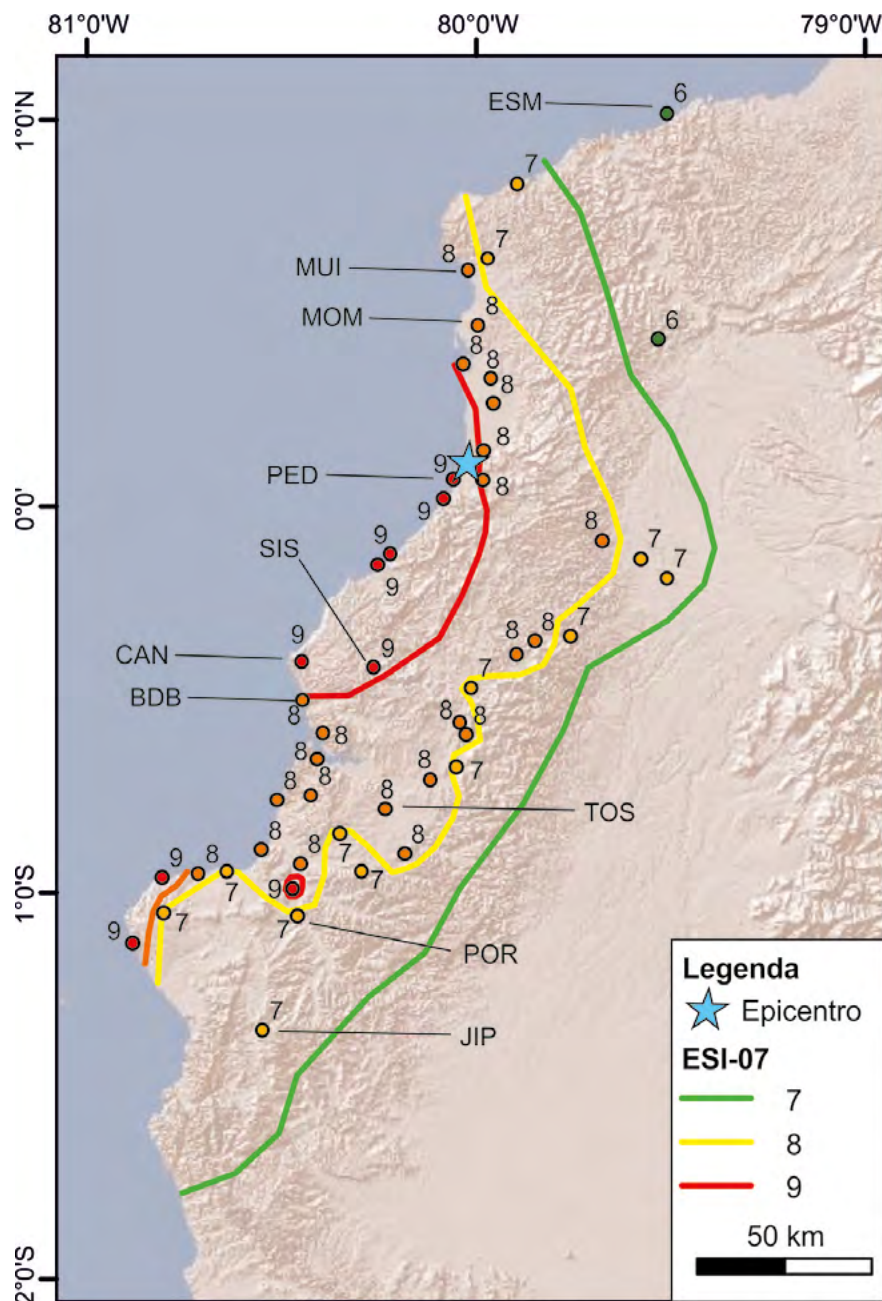


Figura 7. Mappa che mostra le località a cui è stato attribuito un valore di intensità ESI-07 e il campo macrosismico derivante, relativo al terremoto di Pedernales (Ecuador) del 2016 (Mw 7.8). Modificato da Chunga et al. (2018)

- nel caso di regioni poco densamente popolate, dove le osservazioni sull'ambiente antropico sono limitate;
- nel confronto di eventi sismici avvenuti su diverse scale spaziali e temporali.

DEFINIZIONI CHIAVE E PRODOTTI DERIVATI

L'utilizzo della scala ESI-07 è strutturato in due livelli gerarchici spaziali: ciascun effetto ambientale rappresenta un **SITO**; diversi siti in un contesto ambientale omogeneo vengono raggruppati in **LOCALITÀ**, a cui viene attribuito un valore di intensità locale. Nella terminologia comunemente utilizzata, i siti vengono identificati come MDPs (*Macroseismic Data Points*) o IDPs (*Intensity Data Points*). A partire dai valori puntuali di intensità ESI-07 vengono poi delineate le isosisme; la Figura 7 mostra un esempio relativo al terremoto di Pedernales (Ecuador) del 2016 (Mw 7.8).

È poi possibile definire un valore di **intensità EPICENTRALE**, che viene stabilito sulla base delle dimensioni (lunghezza e rigetto) della fagliazione superficiale, e/o delle dimensioni dell'area coinvolta da effetti secondari.

Se nel caso dell'intensità locale le modalità di attribuzione con la scala ESI-07 sono analoghe alle scale MCS o EMS, nel caso dell'intensità epicentrale la scala ESI-07 presenta delle peculiarità, in quanto le altre scale non contemplano la possibilità di valutare effetti lineari (e.g., lunghezza di fagliazione) o areali.

Un'alternativa all'approccio sito-località prevede la suddivisione del territorio in celle di uguale dimensione, e l'attribuzione di un valore di intensità

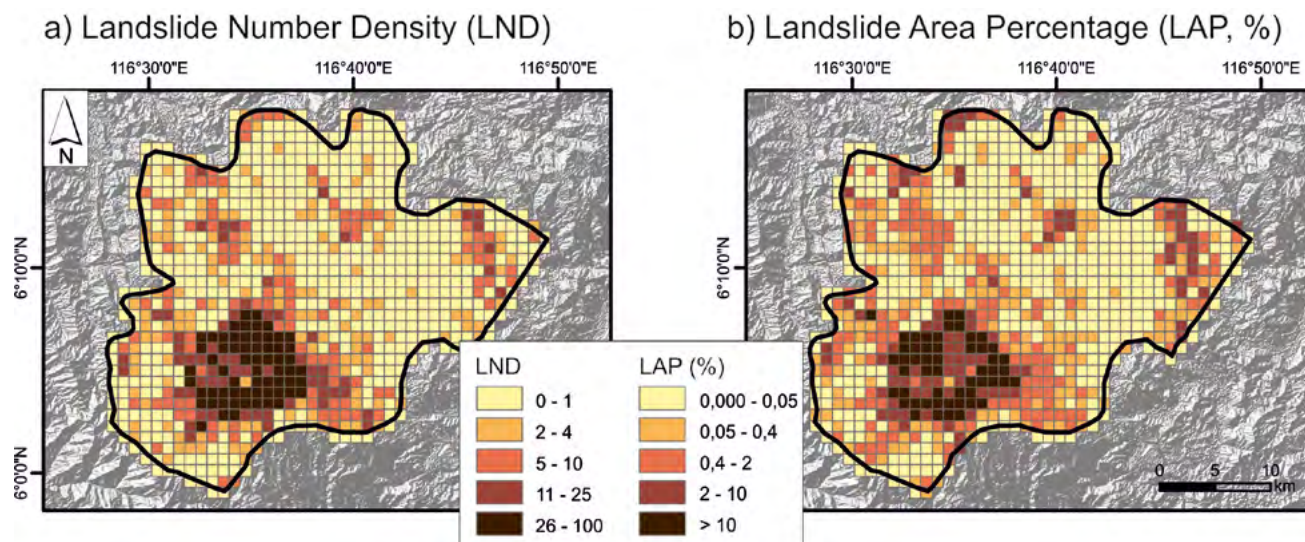


Figura 8: mappe tematiche (LND e LAP) per le frane avvenute a seguito di un terremoto di Mw 6.0 avvenuto nel 2015 sull'isola di Sabah (Malesia; Ferrario, 2022)

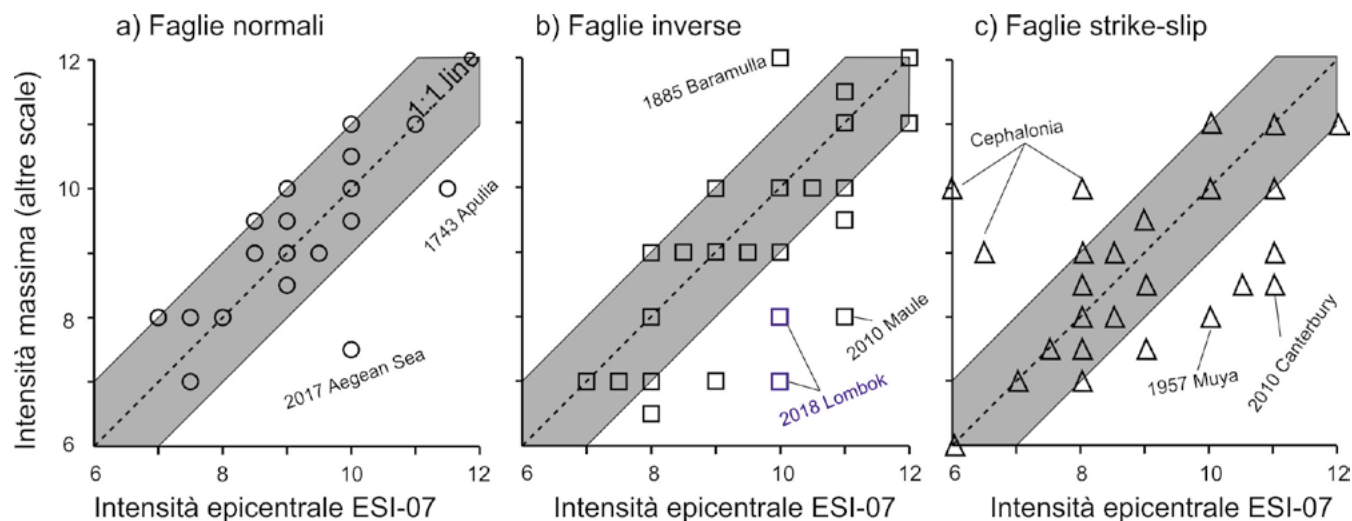


Figura 9. Grafici che mostrano il confronto tra intensità epicentrale ESI-07 e la massima intensità assegnata con altre scale (MCS, EMS, MM). Ogni grafico rappresenta una diversa cinematica

ESI-07 per ciascuna cella. Questo metodo presuppone la disponibilità di dati ad elevata densità spaziale e alcuni esempi sono stati recentemente proposti per le frane sismo-indotte (Figura 8); in particolare, a partire da un dataset di frane, è possibile calcolare il numero di frane per ciascuna cella di 1 km² (LND, *Landslide Number Density*), la percentuale di territorio interessata dalle frane (LAP, *Landslide Area Percentage*). L'intensità ESI-07 viene derivata dall'applicazione di una relazione empirica che trasforma l'area di ciascuna frana in volume.

CASI STUDIO ANALIZZATI CON LA SCALA ESI-07

Sebbene sia stata introdotta molto più recentemente rispetto alle altre scale di intensità, la scala ESI-07 è stata applicata sinora a 157 eventi a livello globale; il dataset completo è accessibile a <https://zenodo.org/record/6390029>.

A 15 anni dall'introduzione della scala ESI-07, è possibile fare un bilancio del suo utilizzo. Confrontando i valori di intensità epicentrale (scala ESI-07) con i valori di intensità massima ottenuti da altre scale macrosismiche (ad esempio MCS, MM, EMS) si può notare una buona corrispondenza, che dimostra come gli effetti ambientali siano degli indicatori affidabili e consistenti nel tempo per valutare il livello di danneggiamento causato da un terremoto o da una sequenza sismica (Figura 9; Ferrario *et al.*, 2022).

Infine, è stato possibile derivare equazioni empiriche tra intensità epicentrale ESI-07, magnitudo momento, lunghezza di fagliazione superficiale e area coinvolta da effetti ambientali secondari (Ferrario *et al.*, 2022). Queste equazioni sono le prime del loro tipo

basate sulla scala ESI-07 e possono fornire uno strumento per arrivare ad una comprensione più completa degli effetti cosismici.

CONCLUSIONE

L'Italia è un Paese ad elevata sismicità e vanta un catalogo di sismicità storica estremamente ricco, che include numerose informazioni sugli effetti ambientali; inoltre, gli effetti ambientali causati dalle recenti sequenze sismiche (e.g., Emilia-Romagna 2012, Centro Italia 2016-2017) sono stati cartografati e misurati con estremo dettaglio. L'applicazione della scala ESI-07 e una valutazione critica degli effetti cosismici ambientali possono fornire utili elementi per una più efficace pianificazione e gestione territoriale, ad esempio nell'ambito della microzonazione sismica o dell'applicazione e revisione dei codici costruttivi. In tale contesto, le competenze geologiche e una adeguata formazione e preparazione dei professionisti in ambito ambientale risultano cruciali per affrontare al meglio le sfide della società moderna, in un territorio fragile e dinamico.

BIBLIOGRAFIA

CHUNGA, K., LIVIO, F., MULAS, M., OCHOA-CORNEJO, F., BESENZON, D., FERRARIO, M.F., MICHETTI, A.M. (2018), *Earthquake Ground Effects and Intensity of the 16 April 2016 M_w 7.8 Pedernales, Ecuador, Earthquake: implications for the source characterization of large subduction earthquakes*. Bull. Seismol. Soc. Am. 108 (6), 3384-3397.

FERRARIO M.F. (2022), *Landslides triggered by the 2015 M_w 6.0 Sabah (Malaysia) earthquake: inventory and ESI-07 intensity assignment*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22, 3527-3542, <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3527-2022>.

FERRARIO M.F., LIVIO F., MICHETTI A.M. (2022), *Fifteen years of Environmental Seismic Intensity (ESI-07) scale: Dataset compilation and insights from empirical regressions*. Quaternary International.

MICHETTI A.M., ESPOSITO E., GURPINAR A., MOHAMMADIOUN B., MOHAMMADIOUN G., PORFIDO S., ROGHOSIN E., SERVA L., TATEVOSSIAN R., VITTORI E., AUDEMARD F., COMERCI V., MARCO S., MCCALPIN J., MORNER N.A. (2004), *The INQUA Scale. An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically induced ground effects in natural environment*. In: VITTORI, E., COMERCI, V. (Eds.), *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, Special Volume 67. APAT, Rome, pp. 1-118, 2004.

MICHETTI A.M., ESPOSITO E., GUERRIERI L., PORFIDO S., SERVA L., TATEVOSSIAN R., VITTORI E., AUDEMARD F., AZUMA T., CLAGUE J., COMERCI V., GURPINAR A., MCCALPIN J., MOHAMMADIOUN B., MÖRNER N.A., OTA Y., ROGHOSIN E. (2007), *Environmental seismic intensity scale-ESI 2007*. Mem. Descr. della Carta Geol. Italia 74, 41.

NAPPI R., PORFIDO S., PAGANINI E., VEZZOLI L., FERRARIO M.F., GAUDIOSI G., ALESSIO G., MICHETTI, A.M. (2021), *The 2017, M_d = 4.0, Casamicciola earthquake: ESI-07 scale evaluation and implications for the source model*. Geosciences, 11(2), 44.

SERVA L., VITTORI E., COMERCI V., ESPOSITO E., GUERRIERI L., MICHETTI A.M., MOHAMMADIOUN B., MOHAMMADIOUN C., PORFIDO S., TATEVOSSIAN R. (2016), *Earthquake hazard and the environmental seismic intensity (ESI) scale*. Pure Appl. Geophys. 173 (5), 1479-1515.

TRINGALI G., BELLA D., LIVIO F., FERRARIO M. F., GROPELLI G., BLUMETTI A.M., DI MANNA P., VITTORI E., GUERRIERI L., PORFIDO S., BOSO D., PETTINATO R., PARADISO G., MICHETTI A.M. (2022), *Fault rupture and aseismic creep accompanying the December 26, 2018, M_w 4.9 Fleri earthquake (Mt. Etna, Italy): Factors affecting the surface faulting in a volcano-tectonic environment*. Quaternary International.

Servizi per il territorio

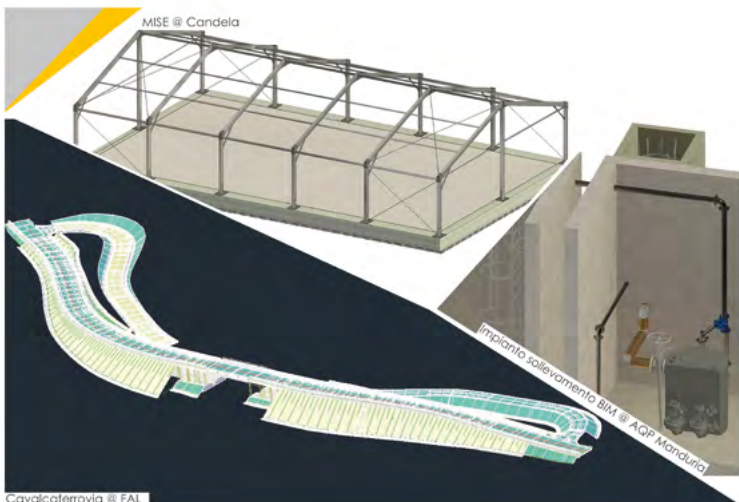


Rilevo speleologo ipogei @ Altamura

DTM @ San Martino D'Agri



Indagini geognostiche in mare @ Cilento



MISE @ Candela

Impianto sollevamento BIM @ AQP Mancinella

Cavalcaterovia @ FAL

Geomatica Geotecnica Geologia
Indagini Geofisiche Progettazione BIM

Diagnostica strutturale
e dei beni culturali

Infrastrutture Idraulica

Geologia applicata

Monitoraggio strutturale

SIT e WebGIS

Monitoraggio ambientale

Strutture

Archeologia Agronomia



www.geoatlas.it - info@geoatlas.it

Rilevamenti geomorfologici di cavità sotterranee presenti nel territorio del Municipio Roma V per la previsione e prevenzione di fenomeni di sinkholes

Gianluca Ferri¹, Carlo Alimonti², Riccardo Paolucci³, Gabriele Scandaliato⁵, Ivano Stranieri⁴, Claudio Succhiarelli²

¹ Roma Capitale, Dipartimento Protezione Civile;

² Roma Capitale, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica;

³ Sotterranei di Roma - Ricerca a.p.s.;

⁴ Roma Sotterranea S.r.l.;

⁵ Roma Capitale, Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana

E-mail: gianluca.ferri@comune.roma.it

Geomorphological surveys of artificial cavities in the 5th Municipality of Rome for predicting and preventing anthropogenic sinkholes in urban area

Parole chiave: Roma, cavità artificiali, sinkholes antropogenici, geomorfologia
Key words: Rome, artificial cavities, anthropogenic sinkholes, geomorphology

1. INTRODUZIONE

In questo articolo si illustrano i risultati delle indagini condotte in tre ambiti territoriali del Municipio Roma V (§ Fig. 1) che il Tavolo Tecnico Interdipartimentale, costituito dallo stesso Municipio nel 2018 e composto da geologi e ingegneri dei Dipartimenti di Programmazione e Attuazione Urbanistica, Protezione Civile e Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, di concerto con le associazioni speleologiche "Roma Sotterranea" e "Sotterranei di Roma", ha svolto per specifici rilevamenti geomorfologici di aree interessate da cavità sotterranee.

Le attività di rilevamento hanno consentito la definizione in prima analisi dello stato di conservazione delle gallerie e l'individuazione delle aree, sia po-

tenziali che in atto, soggette a fenomeni gravitativi di crollo delle volte e a una loro possibile evoluzione previsionale dei processi di dissesto che originano eventi di sprofondamento del suolo urbano. I risultati hanno permesso di valutare la pericolosità dei luoghi propedeutica all'analisi del rischio determinando gli elementi vulnerabili esposti, nonché la predisposizione di interventi tecnici, amministrativi e organizzativi preliminari, nelle more di interventi strutturali risolutivi di messa in sicurezza.

Gli ambiti territoriali interessati hanno riguardato:

1. il comprensorio case popolari dell'Azienda Territoriale per l'Edilizia Residenziale di Roma (A.T.E.R.) in via Tor De' Schiavi 261 e zone limitrofe;

2. il comprensorio di Edilizia Residenziale Pubblica (E.R.P.) di via Buie d'Istria con particolare attenzione alla sede stradale e alle relative pertinenze;
3. le aree del quartiere "Quadraro" comprese tra via Columella, via Giulio Igino e aree adiacenti, ricadenti nel Piano Particolareggiato "Comprensorio Centocelle sub Comprensorio Quadraro".

2 CARATTERI GEOLITOLOGICI DEI TRE AMBITI TERRITORIALI INTERESSATI DAI RILEVAMENTI IPOGEI

Le aree dei tre ambiti territoriali interessati dai rilevamenti ipogei, sono caratterizzate dalla presenza dei depositi piroclastici della Formazione di Villa Senni [Roma Capitale, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Direzione Pianificazione Generale, (a cura di R. Funicello, G. Giordano & M. Mattei) (2016)] riferibile all'ultima eruzione di grande volume del vulcano dei Colli Albani, radiometricamente datata tra 357 ± 2 ka e 338 ± 8 ka e ascrivibile al Pleistocene medio p.p..

Costituiscono la Formazione di Villa Senni due depositi a carattere massivo che, dall'alto verso il basso, sono distinti in:

1. *Pozzolanelle*, composte da una matrice cineritica grossolana-lapillosa, generalmente incoerenti, povere in fini e ricche in cristalli di leucite, biotite e clinopirosseno, contenenti grosse scorie nere, lapilli e blocchi di litici lavici olocristallini;
2. *Tufo Lionato*, di consistenza litoidale, caratterizzato da una matrice

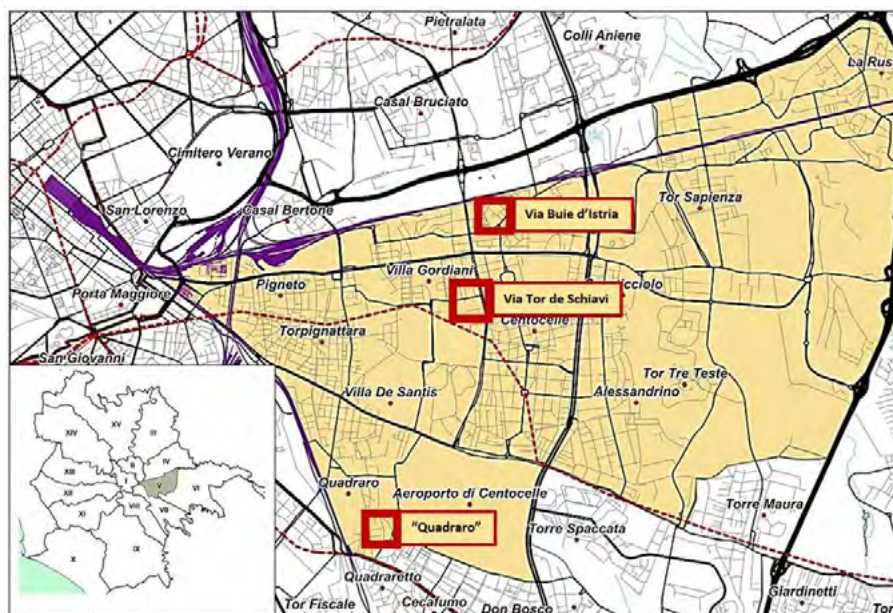


Figura 1. Localizzazione delle aree interessate dai rilevamenti geomorfologici (quadrati rossi)

cineritico-lapillosa con abbondanti pomici gialle, scorie grigie, litici lavici e olocristallini.

In particolare i sondaggi geognostici eseguiti dalla società GeoRes S.r.l. nell'ambito territoriale del quartiere "Quadraro" e le osservazioni condotte all'interno degli ipogei presenti, hanno consentito di definire un assetto litostratigrafico specifico (Geores S.r.l., 2013) costituito, dall'alto verso il basso, in:

- copertura con riporto pozzolanaceo di origine vulcanica di spessore variabile da 0,5 a 1,5 m;
- piroclastite pozzolanacea grigia, di tipo massivo e consistenza variabile da litoide a semilitoide, di spessore pari a circa 2,0 m;
- tufo litoide massivo con una matrice costituita da scorie, cenere vulcanica e clasti scoriacei; il deposito è ascrivibile al Tufo Lionato con uno spessore accertato, dalle stratigrafie di sondaggio, di circa 1,5 m;
- piroclastite pedogenizzata (o paleosuolo) con uno spessore di circa 2,5 m; si rinviene in varie parti delle volte del reticolo caveale ed è spesso interessata da fenomeni di crollo;
- pozzolana nera, costituita da scorie grigio-nerastre, litici olocristallini e sedimentari termo-metamorfosati; il reticolo caveale di via Columella si sviluppa in corrispondenza di tale deposito;
- pozzolana rossa, composta da tufi scoriacei a granulometria sabbioso-ghiaiosa molto addensata, fino a raggiungere lo stato semilapideo dove, al tetto, è stato rinvenuto un paleosuolo di circa 2 m; è stato ipotizzato che l'origine del deposito appartenga al secondo ciclo eruttivo del Tuscolano-Artemisio, datato intorno a circa 460 ka.

3. COMPENSORIO CASE POPOLARI A.T.E.R. DI VIA TOR DE' SCHIAVI 261

A fine gennaio 2021, il manifestarsi di un evento di sprofondamento del suolo nel Compensorio A.T.E.R., ha messo in luce la presenza di una estesa e sconosciuta rete ipogea di gallerie.

Con un rilevamento geomorfologico è stata eseguita una prima valutazione della pericolosità delle cave sotterranee soggiacenti all'area urbana ricompresa tra via Romolo Trinchieri a sud, via Tor De' Schiavi ad est, via Anagni a nord e via Sarno ad ovest" in Roma (§ Fig. 2).

Il rilievo speleo-topografico sul quale è stato eseguito il rilevamento geomorfologico, fu realizzato tra ottobre e novem-



Figura 2. Ubicazione dell'area sotterranea di studio ricompresa tra via Romolo Trinchieri a sud, via Tor De' Schiavi ad est, via Anagni a nord e via Sarno ad ovest

bre 2021 dalla Società Roma Sotterranea s.r.l. su incarico del Dipartimento Protezione Civile di Roma Capitale.

Il rilevamento geomorfologico ha riguardato una porzione dell'estesa rete caveale evidenziando la presenza di depositi detritici di accumulo prodotti dai progressivi distacchi gravitativi di crollo dalle volte, causa di occlusioni parziali o totali alla percorribilità pedonale delle gallerie.

I dati del rilevamento sotterraneo e di quelli di superficie, acquisiti con tecnologia laser scanner, sono stati restituiti nella "Carta del rilevamento geomorfologico" della rete di gallerie (§ Fig. 3).

Per quanto concerne invece l'analisi dell'interazione soprassuolo-sottosuolo, è stata redatta la "Carta di rischio potenziale per sprofondamenti del suolo".

Le cavità antropiche di via Tor De' Schiavi hanno avuto origine dalle attività estrattive di materiali inerti (pozzolana) condotte in epoca antica e probabilmente proseguita nelle epoche successive, formando un esteso sistema

ipogeo con andamento strutturale di tipo reticolare a camere e pilastri.

Sono state indagate le porzioni originarie delle volte delle cavità senza evidenti elementi potenziali di crollo, le percolazioni e gli stillicidi per infiltrazioni idriche provenienti dai sovrastanti depositi sedimentari superficiali e dalle aree esterne non oggetto d'indagine, nonché le aree delle gallerie interessate da vibrazioni indotte per attività antropiche in superficie, quali il transito degli autoveicoli e/o il funzionamento di macchine industriali.

Si è proceduto inoltre a rilevare i dissesti in calotta e sui fianchi delle gallerie (§ Fig. 4), in quanto indizi di processi di decadimento e di instabilità in evoluzione progressiva.

L'acquisizione dei dati del rilevamento geomorfologico ha così consentito una definizione analitica dell'interazione tra lo stato di conservazione delle gallerie e il soprassuolo.

Le aree indagate sono state suddivise in 4 settori urbani:

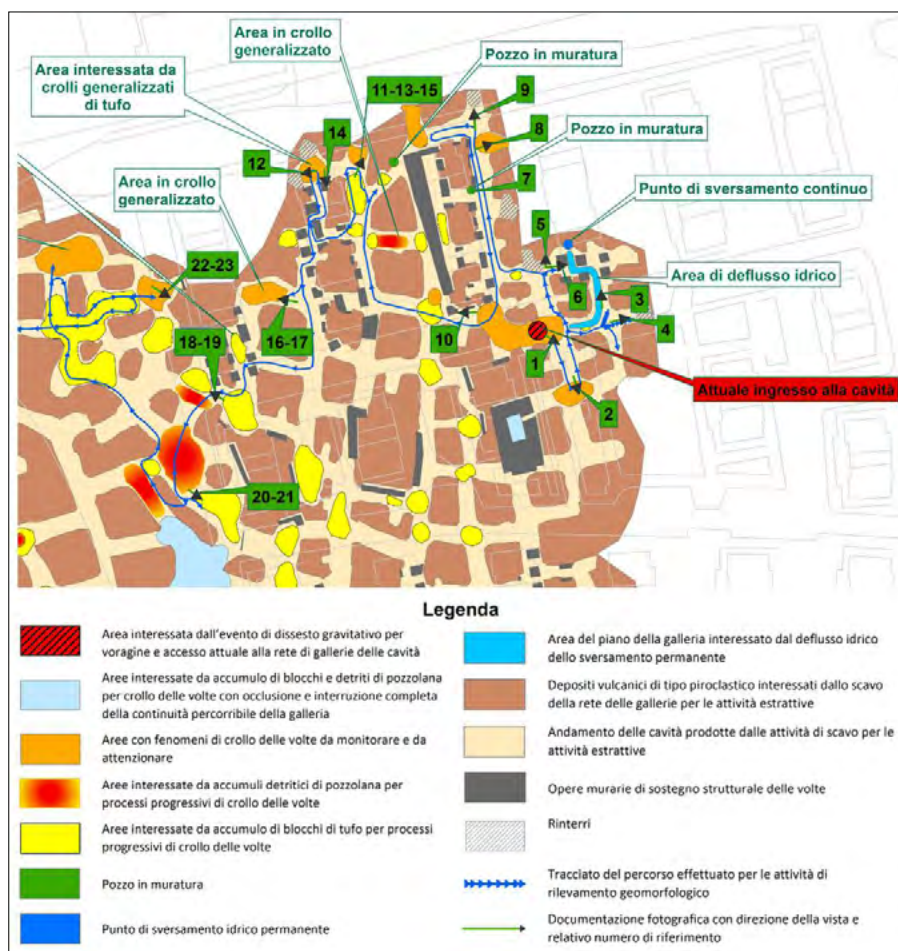


Figura 3. Stralcio della carta e della legenda del rilevamento geomorfologico delle cavità sotterranee presenti nel Comprensorio Case Popolari A.T.E.R. di via Tor De' Schiavi 261 e aree adiacenti (Alimonti C., Amatori R., Ferri G., Raucci M., Scandaliato G., Succhiarelli C. - 2022)

1. settore 1, area interna e soggiacente al Comprensorio in gestione ATER di via Tor De' Schiavi 261;
2. settore 2, area soggiacente al Parco Somaini (area del Comprensorio Archeologico "Ad Duos Lauros");
3. settore 3, area soggiacente all'Istituto di Istruzione Secondaria Superiore "Giorgio Ambrosoli" (§ Fig. 5);
4. settore 4, area soggiacente al mercato coperto ubicato a sud di via Romolo Trinchieri.

Nel settore 1 il rilevamento geomorfologico ipogeo ha evidenziato la presenza di n. 6 dissesti gravitativi strutturali delle volte qui di seguito descritte:

- a) un'estesa area di crollo che ha interessato parti delle calotte di dimensioni pari a circa 170 m² di superficie, con spessore residuale tra l'intradosso della volta interna e il piano urbano esterno pari a circa 2,3 m (§ Fig. 6);
- b) un'area con la presenza di un ampio crollo che ha interessato il tufo litoide, aggravato dalla presenza di

apparati radicali delle specie arboree in superficie, che ha dato origine ad uno spessore residuale tra la volta interna e il piano urbano esterno pari a circa 2,4 m;

- c) due aree caratterizzate da crolli in calotta del tufo litoide con spessore residuale tra la volta interna e il piano urbano esterno, rispettivamente di circa 3,8 m e 3,1 m;
- d) un'area con la presenza di un ampio crollo in calotta di tufo litoide, recentemente interessata da scavi del piano urbano esterno per interventi infrastrutturali di servizio. Lo spessore residuale tra la volta interna e il piano di calpestio esterno è pari a circa 2,9 m;
- e) un'area con presenza di una interazione tra la parte di una volta di un tratto di galleria e un solaio di calpestio del piano terra di un edificio sovrastante con fondazioni dirette del tipo a platea; la volta del solaio è lesionata in più punti ed è posizionata a circa 9 m dal piano di calpestio della galleria, dove è stato rinvenuto un pozzo circolare profondo circa 5 m con ogni probabilità utilizzato in passato per approvvigionamento idrico.

Queste aree presentano un elevato fattore di pericolosità costituito dal potenziale crollo degli strati geolitologici dei depositi ricompresi tra la volta e la superficie urbana esterna, con possibile formazione di voragini per sprofondamento gravitativo del suolo, mentre per il punto e) si è rilevato il possibile cedimento strutturale del solaio di calpestio del piano terra dell'edificio, comunicato all'Ente gestore del comprensorio edilizio.

Nel settore 2, costituito da un'area sottostante al Parco Somaini (area del Comprensorio Archeologico "Ad Duos



Figura 4. Estesi fenomeni di dissesto per crollo gravitativo delle volte in un tratto di galleria

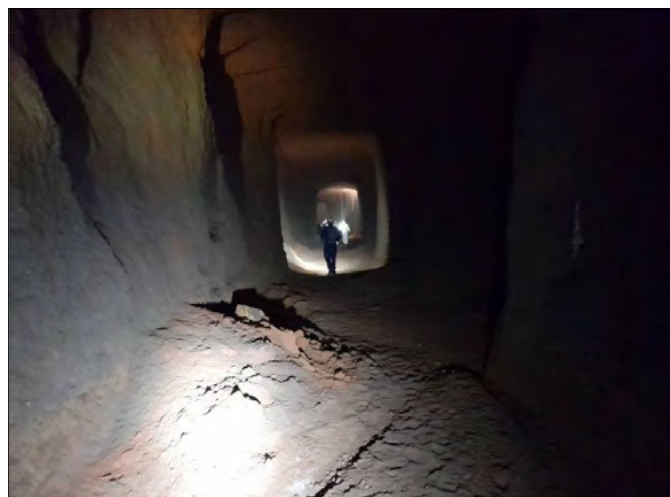


Figura 5. Tratto di galleria di cava in corrispondenza delle aree dell'Istituto di Istruzione Secondaria Superiore "Giorgio Ambrosoli"



Figura 6. Evento di voragine che ha messo in luce l'esteso sistema caveale con spessore residuale tra l'intradosso della volta interna e il piano urbano esterno pari a circa 2,3 m.

Lauros”), è stata rilevata una circoscritta zona della volta di una galleria con fenomeni di crollo gravitativo dei depositi geolitologici sovrastanti con uno spessore compreso, tra l'intradosso della volta e la superficie urbana esterna, pari a circa 2 m; in questo settore l'impianto caveale fu, fino a recente uso, adibito alla coltivazione di funghi; anche quest'area

circoscritta è caratterizzata da elevata pericolosità per la possibile formazione di una voragine in superficie per sprofondamento gravitativo.

Nel settore 3, in un'area soggiacente all'Istituto di Istruzione Secondaria Superiore “Giorgio Ambrosoli”, le cavità sotterranee sono interessate da diffuse percolazioni d'acqua non odorosa e dalla

presenza di pali di fondazione a sostegno della sovrastante struttura scolastica. Lo spessore dei depositi piroclastici sciolti compreso tra le volte e il piano urbano esterno è pari a circa 3,5 m.

Nel settore 4, individuato come l'area soggiacente al mercato pubblico coperto ubicato poco più a sud di via Romolo Trinchieri, sono stati rilevati diffusi crolli che hanno interessato sia le volte che i pilastri delle gallerie con possibile evoluzione progressiva dei dissesti gravitativi ipogei di crollo fino al piano urbano esterno.

4. COMPENSORIO DI EDILIZIA RESIDENZIALE PUBBLICA (E.R.P.) DI VIA BUIE D'ISTRIA

Sin dai primi anni '90, via Buie d'Istria è stata interessata da numerosi sprofondamenti della sede stradale correlati alla presenza di una estesa rete di cavità sotterranee di origine antropica (§ Fig. 7).

I primi eventi (fronte civ. 7 nel 1992; fronte civ. 9 nel 2016 - lato marciapiede verso sud; a centro strada tra i civv. 9 e 11 nel 2017) furono oggetto di riempiimenti superficiali e localizzati; a marzo 2020, invece, a seguito di lavori di scavo e rinterro per la posa in opera di cavidotti, si verificava un ulteriore sprofondamento del suolo (alt. civ. 6) che metteva in luce



Figura 7. Il comprensorio di edilizia residenziale pubblica (E.R.P.) di via Buie d'Istria interessato da una rete di cavità sotterranee

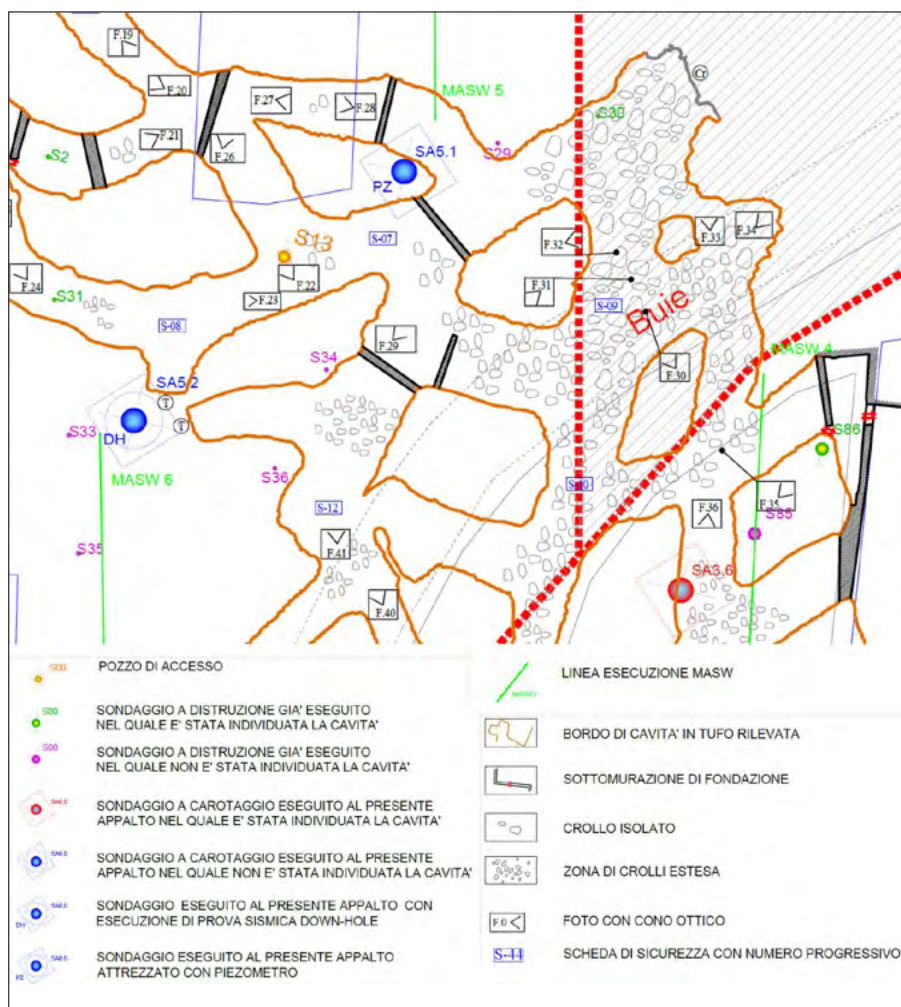


Figura 8. Stralcio del rilievo geomorfologico della rete di gallerie sottostanti al Comprensorio E.R.P. di via Buie d'Istria (Soc. Coop. "CLIC" – Napoli, 2021)

tubazioni di adduzione gas, acqua e una condotta fognaria, oltre a porzioni di gallerie interessate in un recente passato da riempimenti di inerti per puntuali interventi di bonifica che hanno reso impossibile le ispezioni dirette.

Il rilievo geomorfologico della rete di gallerie sottostanti al Comprensorio E.R.P. di via Buie d'Istria, realizzato sul-

la base di un rilievo speleo-topografico eseguito con tecnologia laser scanner dalla Soc. Coop. "CLIC" di Napoli (§ Fig. 8), ha evidenziato la presenza di dissesti generalizzati delle volte e dei fianchi che in alcuni punti si sono evoluti in camini di collasso prossimali alla superficie urbana esterna per sversamenti di reflui fognari.



Figura 9. Crollo di un tratto di fogna ovoidale in muratura di circa 4 m lineari non in esercizio, con occlusione delle diramazioni laterali della rete di gallerie (per gentile concessione della Soc. Coop. CLIC – Napoli)

Realizzato l'elaborato plano-altimetrico aggiornato della rete di cavità e la documentazione ad esso allegata, si è proceduto al rilevamento geomorfologico delle gallerie per la verifica del loro stato di conservazione, che ha evidenziato la presenza di:

- aree con crolli diffusi delle volte;
- aree con eventi di instabilità per distacchi dalle pareti;
- un'area con infiltrazione e percolazione idrica permanente;
- opere murarie di sostegno delle volte delle gallerie poste in corrispondenza delle fondazioni degli edifici sovrastanti che, anche a causa dei riempimenti realizzati in passato, hanno prodotto separazione e interdizione al transito esplorativo di specifici tratti caveali.

Le aree caratterizzate da crolli diffusi delle volte sono localizzate in due zone interessate da evoluzione differenziata dei fenomeni di dissesto gravitativo.

La prima zona è compresa tra la sede stradale di via Buie d'Istria e l'area verde libera antistante l'edificio 14 e l'edificio 15. Essa è contraddistinta dal distacco di blocchi massivi di roccia piroclastica di dimensioni volumetriche pari a circa 1-1,5 m³.

L'evoluzione del dissesto è rappresentata da una fase di emersione progressiva delle volte verso la superficie urbana, con spessore residuo pari a circa 2 m. In quest'area il fenomeno di dissesto ha prodotto il crollo di un tratto di fogna ovoidale in muratura di circa 4 m lineari non in esercizio, con occlusione delle diramazioni laterali della rete di gallerie (§ Fig. 9).

In tale zona si è osservata la presenza di apparati radicali terminali delle specie arboree di alto fusto (*sp. Platanus*) ubicate nelle aree pedonali della viabilità stradale, che hanno contribuito all'evoluzione del dissesto.

La seconda zona è ubicata in corrispondenza con la superficie esterna, nell'area verde libera compresa tra l'edificio 15 e l'edificio 16. Il dissesto è costituito dal distacco di blocchi di tufo lionato dalle volte per esteso splaccaggio di una superficie pari a circa 12 m².

Si differenzia dal primo dissesto descritto per non mostrare un'evoluzione progressiva verso la superficie, ma uno sviluppo lineare uniforme sull'intera volta del tratto di galleria.

Le aree con instabilità per distacchi dalle pareti riguardano in modo più o meno uniforme e, in gran parte, le gallerie oggetto di rilevamento geomorfologico.

L'azione disagregativa è stata causata dalla successione alternata di processi di

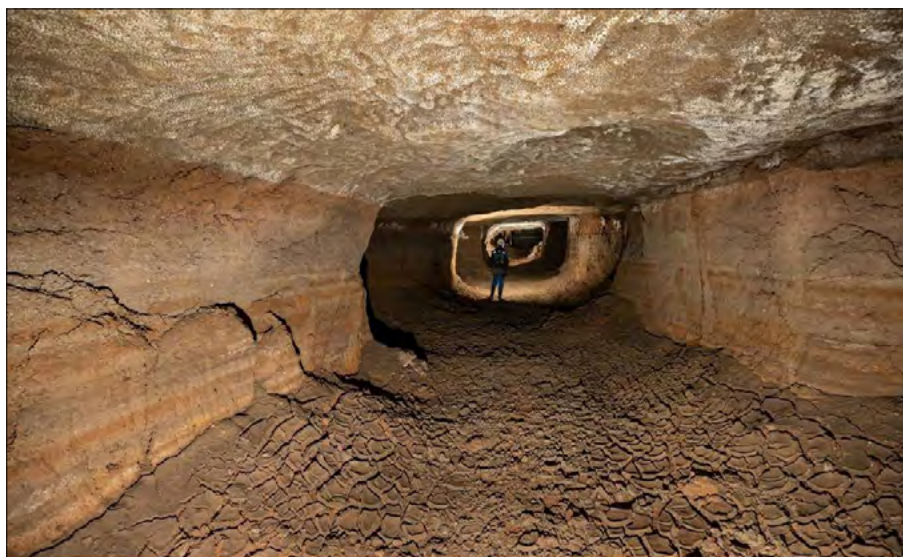


Figura 10. Azione disagregativa delle pareti laterali causata dalla successione alternata di processi di imbibizione per sversamenti fognari e successivi disseccamenti (per gentile concessione della Soc. Coop. CLIC – Napoli)



Figura 11. Opere murarie costituite da blocchi non squadri di tufo e mattoni. La loro funzione originaria era di sostegno strutturale alle sovrastanti fondazioni degli edifici realizzati negli anni '50 (per gentile concessione della Soc. Coop. CLIC – Napoli)



Figura 12. Sezione laser scanner del pozzo verticale di accesso alle cave di via Giulio Igino con evidenza di un'area di crollo (a sx) e di un'opera muraria di sostegno strutturale della volta (a dx)

imbibizione per sversamenti fognari e di successivi disseccamenti (§ Fig. 10), associati ad una progressiva alterazione chimico-fisica delle pareti caveali costituite da sedimenti di pozzolana e testimoniata da residue tracce di muffe biancastre sulle pareti, nonché da rifiuti igienico-sanitari rinvenuti sul piano di calpestio.

L'area con infiltrazione e percolazione idrica permanente, è stata rilevata in un tratto della volta corrispondente con la superficie esterna, tra la sede stradale di via Buie d'Istria e l'area libera di pertinenza compresa tra gli edifici E.R.P. nn. 11 e 12; il rilevamento geomorfologico ha evidenziato una percolazione diffusa e continua di acque bianche non odorose, con stillicidio sul piano di calpestio delle cave in un'area pari a circa 10 m².

Le opere murarie di sostegno delle volte delle gallerie, che hanno prodotto anche separazione e interdizione al transito esplorativo di specifici tratti caveali, hanno riguardato, in modo diffuso, quelle parti delle gallerie che soggiacciono agli edifici residenziali pubblici costituenti il comprensorio E.R.P. di via Buie d'Istria. Tali opere murarie sono costituite da blocchi non squadri di tufo e mattoni (§ Fig. 11) e la loro funzione originaria era di sostegno strutturale alle sovrastanti fondazioni degli edifici realizzati negli anni '50, in relazione al programma degli interventi urbanistici che interessarono l'area.

Queste murature erano originariamente dotate di piccole aperture alla loro base che consentiva la continuità di esplorazione ma, a causa dei riempimenti subiti, esse sono oggi visibili in pochissimi casi.

Le murature presentano soluzioni di continuità con gli elementi che dovrebbero sostenere. Ciò è dovuto, in parte, alla scarsa qualità della malta utilizzata che nel corso del tempo è stata interessata da processi disagregativi della matrice cementizia con gli elementi lapidei e, in parte, all'alterazione chimico-fisica delle pozzolane. Dall'esame visivo è emersa un'importante criticità legata alla capacità portante sia delle murature che delle volte stesse, in alcuni casi splaccate.

5. AREE DEL QUARTIERE "QUADRARO" (VIA COLUMELLA E VIA GIULIO IGINO)

A seguito di segnalazione del Municipio Roma V per uno sprofondamento del suolo verificatosi in via Giulio Igino in data 05.02.2021, le indagini di approfondimento del caso accertarono la presenza di un pozzo verticale di accesso alle cave ubicato in proprietà privata (§ Fig. 12).



Figura 13. Cave di via Giulio Igino. Area in dissesto generalizzato e progressivo delle volte



Figura 14. Cono detritico di riempimento di una voragine, prevalentemente costituito da sversamento di rifiuti solidi urbani



Figura 15. Vista parziale del sistema di cavità sotterranee a rete presente nell'area ipogea di via Giulio Igino in prossimità della confluenza di due rami di gallerie

La prima ispezione degli ambienti ipogei mise in luce la presenza di un esteso reticolo caveale con ampiezza e caratteristiche ignote nell'area compresa tra via di Centocelle e via Columella che rese necessario realizzare un rilievo plano-altimetrico georeferenziato e attività di rilevamento geomorfologico della rete di gallerie.

L'esteso reticolo caveale rinvenuto a seguito della prima ispezione diretta, si associa per continuità costruttiva a quello già rilevato ad ottobre 2019 tra via Columella e via Cincinnato [Succhiarrelli *et al.*, 2020 – Ass.ne Spel. “Sotterranei di Roma”, 2013].

I rilevamenti geomorfologici delle due reti ipogee poste in adiacenza tra loro ma non comunicanti, hanno consentito l'individuazione e la localizzazione di specifiche aree interessate da fenomeni prodotti da attività antropiche e di tipo gravitativo, costituiti da:

- aree in dissesto locale e generalizzato di pilastri, volte e fianchi delle gallerie (§ Fig. 13);
- sversamenti attivi, recenti e passati di reflui fognari con deflussi in ipogeo che hanno diminuito il grado di stabilità delle calotte e dei fianchi delle gallerie;
- aree con percolazioni e stillicidio di fluidi idrici;
- aree con strutture di fondazione su pali;
- strutture di sostegno in muratura (pilastri e pareti murarie realizzate con mattoni e malta cementizia) anche con gravi lesioni per sforzi verticali di compressione, localizzate in corrispondenza delle fondazioni superficiali degli edifici sovrastanti;
- cono detritico di riempimento di eventi di sinkholes, prevalentemente costituiti da materiali di rifiuto provenienti dalle attività di costruzione e demolizione e a sversamenti di rifiuti solidi urbani (§ Fig. 14);
- colate di fluidi cementizi sul piano di calpestio delle gallerie, provenienti da adiacenti immissioni di miscele di riempimento.

Nel complesso generale, le due reti caveali presentano uno sviluppo orientato lungo diversi assi tra loro ortogonali, espandendosi nelle quattro direzioni nord, est ovest e sud.

Si tratta di un articolato sistema di cavità sotterranee a rete di vaste dimensioni (§ Fig. 15), i cui limiti spaziali non sono ancora del tutto rilevati, con dimensioni di altezza e larghezza delle gallerie che variano da circa 1,8 m a circa 3 m.

La mappatura dei dissesti ha consentito di identificare le aree ipogee pericolose, redigere le cartografie di rischio sulla base degli elementi esposti in superficie e, quindi, agire in modo preventivo con la definizione propedeutica delle misure preventive e la tipologia degli interventi di messa in sicurezza da predisporre per la mitigazione dei rischi.

6. CONCLUSIONI TECNICHE E PRESCRIZIONI PROGETTUALI

6.1 COMPENSORIO CASE POPOLARI A.T.E.R. DI VIA TOR DE' SCHIAVI 261 E AREE ADIACENTI

L'elaborazione complessiva dei dati raccolti ha consentito di definire specifiche misure di prevenzione unitamente all'emissione di provvedimenti amministrativi, allo scopo di avviare una prima fase di attività di protezione e messa in sicurezza delle aree.

Gli interventi e le misure di prevenzione sono distinte in funzione dei 4 settori identificati come prioritari in relazione alle conoscenze acquisite, alla pericolosità e alle classi di rischio elaborate.

L'importanza di aver eseguito una zonazione dell'area rilevata per rischio di sprofondamento del suolo è giustificata dalla necessità di individuare aree a maggiore potenzialità di crollo che richiedono urgenti interventi di risanamento.

In relazione alla presenza di cavità ipogee è stato definito il pericolo per sprofondamento del suolo la sola accensione della minore o maggiore possibilità che possano verificarsi voragini e/o subsidenze per crollo delle volte delle cavità stesse.

Tra le cause individuate si sono riscontrate:

- debolezze strutturali dovute all'intersezione di due o più rami di gallerie (causa predisponente);
- riduzione della resistenza meccanica dei depositi vulcanici dovuta a fenomeni di stillicidio e percolazioni d'acqua (causa determinante);
- crolli e fratturazioni in calotta del tufo lionato (dovuto ai suddetti fattori).

Nel settore 1, costituito dall'area interna al comprensorio ATER di via Tor De' Schiavi 261, gli interventi tecnici generali e amministrativi con adempimento propedeutico immediata hanno riguardato 8 azioni principali così distinte:

1. recupero di ogni informazione utile a ricostruire il sistema costruttivo e fondale dei fabbricati;
2. interdizione delle aree a pericolosità "molto elevata" P4 con recinzioni fisse rigide, controllandone la loro integrità a cadenza bimensile;
3. realizzazione di un accesso orizzontale alla rete di gallerie dalla scarpata prospiciente a via Fiuggi, per le attività di controllo periodico delle strutture di sottofondazione dei fabbricati ATER e dello stato di conservazione delle gallerie;
4. controllo a cadenza prestabilita dello stato di conservazione dei muri e dei pilastri di sottofondazione dei fabbricati ATER;
5. valutazione della stabilità delle volte mediante esplorazione diretta a cadenza programmata;
6. analisi della rete di drenaggio fognario interagente con le gallerie sotterranee;
7. individuazione e risoluzione della problematica dello sversamento fognario individuato nella Carta Geomorfologica (Fig. 3 - punto di sversamento continuo);
8. controllo periodico della tenuta della rete di adduzione idrica agli edifici.

Le misure e gli interventi strutturali di messa in sicurezza sono stati definiti in:

1. realizzazione di paratie e/o cassature di confinamento delle porzioni di cavità da mettere in sicurezza tramite riempimento con aggregati inerti riciclati (C&D);
2. procedimento di riempimento con la preservazione della possibilità di accesso alle diramazioni laterali delle cavità da bonificare;
3. riempimento del vuoto sotterraneo con materiali inerti o altra opera idonea ad evitare eventuali crolli del solaio (sistemi a secco, consolidamenti etc.);

Nel settore 2, costituito dall'area del Parco Somaini, gli interventi tecnici generali ed amministrativi con adempimenti immediati hanno riguardato 2 azioni principali:

1. verifica dello spessore residuo di terreno a seguito del crollo puntuale;
2. verifica della presenza di eventuali accessi superficiali in cava.

Le propedeutiche misure e gli interventi strutturali di messa in sicurezza sono stati definiti in:

1. interdizione superficiale dell'area verde con rete metallica elettrosaldata;

2. indagini geognostiche a distruzione di nucleo per la verifica della circoscritta area di crollo in calotta;
3. realizzazione di paratie e/o cassature di confinamento della porzione di cavità da mettere in sicurezza tramite riempimento con aggregati inerti riciclati (C&D);
4. procedimento di riempimento con la preservazione della possibilità di accesso alle diramazioni radiali della cavità da bonificare.

Nel settore 3, costituito dall'area dell'Istituto di Istruzione Superiore "Giorgio Ambrosoli", gli interventi tecnici generali ed amministrativi con adempimento propedeutico immediata hanno riguardato 2 azioni principali:

1. controllo periodico della stabilità delle volte parzialmente soggiacenti all'Istituto;
2. verifica della tenuta della rete idrica e di quella antincendio a servizio dell'Istituto e riparazione dei tratti di condotta che causano sversamenti d'acqua nel sottosuolo.

Le propedeutiche misure e gli interventi strutturali di messa in sicurezza riguarderanno essenzialmente la verifica della tenuta della rete idrica e di quella antincendio a servizio dell'Istituto e riparazione della perdita idrica.

Nel settore 4, costituito dall'area di via Romolo Trinchieri gli interventi tecnici generali ed amministrativi con adempimento propedeutico immediata hanno riguardato 4 azioni principali:

1. il controllo periodico della stabilità delle volte soggiacenti al mercato coperto mediante esplorazioni dirette;
2. l'analisi della rete di scolo delle acque meteoriche eventualmente interagente con le gallerie sotterranee e risoluzione di eventuali problematiche;
3. l'analisi della rete di drenaggio fognario e di adduzione idrica eventualmente interagente con le cavità sotterranee (verifica di infiltrazioni idriche);
4. la verifica degli attuali spessori residui di terreno tra la volta e il piano stradale.

Le misure e gli interventi strutturali di messa in sicurezza di questo settore sono state indirizzate principalmente in 3 azioni:

1. la verifica dello stato tensionale del sottosuolo per eventuali interdizioni dell'area da attuarsi nelle more dell'intervento;
2. la realizzazione di paratie e/o cassature di confinamento del tratto

di gallerie da mettere in sicurezza tramite riempimento con materiali inerti;

3. il procedimento di riempimento con la preservazione della possibilità di accesso alle diramazioni radiali delle cavità da bonificare.

6.2 COMPENSORIO E.R.P. DI VIA BUIE D'ISTRIA

L'analisi dei risultati delle aree interessate dai dissesti ha consentito di predisporre preliminarmente 5 principali interventi di seguito distinti:

- ampliamento della interdizione temporanea di via Buie d'Istria dal civico 7 fino ai civici 12/17 esclusi, procedendo al contestuale spostamento e/o rimozione di ogni autoveicolo parcheggiato;
- verifica della perdita idrica rilevata in corrispondenza della sede stradale di via Buie d'Istria da parte di ACEA ATO2 S.p.A.;
- ubicazione dei confinamenti per la messa in sicurezza della sede stradale e delle sue pertinenze che sono in interazione con le sottostanti cavità sotterranee;
- verifica delle essenze arboree d'alto fusto da eliminare, in quanto favorenti il dissesto del sottosuolo in corrispondenza dei rami di gallerie;
- esecuzione di sondaggi geognostici a cura del Dipartimento CSIMU, in numero e ubicazione da definire, tesi alla verifica delle prosecuzioni delle cavità nei punti di inaccessibilità sotterranea (confinamenti con pali, crolli a sezione piena etc) e nelle zone in cui essi non sono ancora stati eseguiti (tratto tra le palazzine 9 e 13).

6.3 AREE DEL QUARTIERE "QUADRARO" (VIA COLUMELLA E VIA GIULIO IGINO E AREE ADIACENTI)

Nell'ambito territoriale del quartiere "Quadraro", le misure preventive adottate sono state distinte propedeuticamente in tre fasi tipologiche:

- rilievo speleo-topografico per l'identificazione dello sviluppo estensivo della rete delle cavità;
- valutazione e definizione delle aree prioritarie a rischio che necessitano di interventi strutturali di messa in sicurezza;
- adozione di misure temporanee di limitazione del traffico veicolare.

Il rilievo speleo-topografico per l'identificazione dello sviluppo estensivo della rete di cavità riguardano tre zone:

- l'area adiacente a via Columella, compresa tra la stessa via Columella a nord e ad est, via Diana a sud e via Dei Quintili a ovest. Particolare attenzione è prestata alle interferenze con la viabilità (via Cincinnato, via Diana, via Columella, via Dei Quintili);
- la zona con estensione ad ovest verso via Cerere, via dei Quintili, via Maia e via Cincinnato;
- la zona con estensione in direzione sud e comprese tra via Columella, via Cincinnato e via Asconio Pediano.

La valutazione e la definizione delle aree prioritarie a rischio che necessitano di interventi strutturali di messa in sicurezza, è data dall'elaborazione delle interazioni dei rilievi speleo-topografici con le strutture insediative e infrastrutturali presenti in superficie; in alternativa, cioè nell'impossibilità di accesso diretto alla rete di gallerie, dovranno essere eseguiti: sondaggi a distruzione di nucleo per la localizzazione delle gallerie; videoispezioni nei fori di sondaggio con aste telescopiche e videocamera; eventuale realizzazione di pozzi di accesso alla rete sotterranea al fine di salvaguardarne l'ispezionabilità a seguito dell'intervento di consolidamento.

L'adozione preventiva di misure temporanee di limitazione del traffico veicolare riguarda la diminuzione delle sollecitazioni dinamiche nei tratti stradali con presenza di cavità oggetto della valutazione del rischio, definite in 3 zone:

- divieto di transito ai veicoli di peso superiore a 35 q per un tratto di via Columella;
- inversione del senso di marcia di via dei Ciceri, disposta in direzione via degli Angeli;
- interdizione del traffico veicolare del tratto di via dei Quintili ricompreso tra via degli Arvali e via degli Ortensi, fino al termine degli interventi di consolidamento del sottosuolo.

BIBLIOGRAFIA

ALIMONTI C., AMATORI R., FERRI G., RAUCCI M., SCANDALIATO G., SUCCHIARELLI C. (2022), *Rilevamento geomorfologico delle cave sotterranee presenti nel sottosuolo di via Tor De' Schiavi nell'area ricompresa tra via Romolo Trinchieri a sud, via Tor De' Schiavi ad est, via Anagni a nord e via Sarno ad ovest in Roma*, relazione tecnica interna, pagg. 33 con 3 cartografie, (Carta del rilevamento geomorfologico del sottosuolo, Carta della pericolosità per sprofondamento veloce del suolo, Carta del rischio per sprofondamento veloce del suolo) scala

1:550, elaborati interni, Roma Capitale, Dipartimento Protezione Civile, Roma.

ALIMONTI C., FERRI G., SUCCHIARELLI C. (2022), *Carta del rilevamento geomorfologico di un tratto di rete caveale ipogea soggiacente a via Buie d'Istria ed aree adiacenti (Municipio Roma V)*, scala 1:90, 1 foglio, elaborato interno, Roma Capitale, Dipartimento Protezione Civile, Roma.

GEORES S.R.L. (2013), *Report riepilogativo*, Roma Capitale, Dipartimento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, U.O. VIII, pagg. 23, Roma.

ROMA CAPITALE, DIPARTIMENTO PROGRAMMAZIONE E ATTUAZIONE URBANISTICA, DIREZIONE PIANIFICAZIONE GENERALE (a cura di R. FUNICIELLO, G. GIORDANO & M. MATTEI) (2016), *Carta geolitologica del territorio di Roma Capitale*, elaborato G9.1, scala 1:20.000, 11 fogli, aggiornamento 2016 degli elaborati geologici e vegetazionali di approvazione 2008 del Piano Regolatore Generale con adozione della Carta Geologica del Comune di Roma, 2008 (a cura di R. Funicello, G. Giordano & M. Mattei) con delibera di Giunta Capitolina n. 184/2020.

ROMA CAPITALE, DIPARTIMENTO SVILUPPO INFRASTRUTTURE E MANUTENZIONE URBANA, U.O. EDILIZIA SOCIALE E SCOLASTICA (2021), *Appalto lavori delle indagini geognostiche e strumentali di supporto alla progettazione degli interventi di completamento consolidamento cavità, edifici e aree esterne n. 6, 7, 8, 9, 10, 11 in Largo Terme Gordiane, via Pisino, via Buie d'Istria*, scala 1:200, elaborati interni, Società Cooperativa Lavori in Corda "CLIC".

SOTTERRANEI DI ROMA, RICERCA - A.P.S. (2021), *"Servizio di rilievo plano-altimetrico e attività di documentazione degli ambienti ipogei presenti nell'area ricompresa tra via di Centocelle e via Columella"*, con n. 1 cartografia planimetrica, 1 cartografia con n. 5 sezioni trasversali, 1 sezione longitudinale in laser scanner, elaborati interni, Roma Capitale, Dipartimento Protezione Civile.

SUCCHIARELLI C., ALIMONTI C., FERRI G., DI RENZO D. (2020), *Relazione geologica - geomorfologica preliminare di una rete caveale ipogea situata tra via Cincinnato e via Columella (P.P. Compensorio Centocelle, sub - comprensorio Quadraro, Municipio Roma V) per la predisposizione degli interventi di indagine e la definizione delle aree pericolose per le opere di messa di messa in sicurezza*, pp. 11 con 4 cartografie, Roma Capitale, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica Direzione Pianificazione Urbanistica Generale, Dipartimento Sicurezza e Protezione Civile, Direzione Protezione Civile.

Studio numerico parametrico dell'influenza di fattori ambientali, geo-strutturali e geomeccanici sulla stabilità di falesie costiere in rocce tenere

Piernicola Lollino, Gioacchino Francesco Andriani, Giuseppe Diprizio, Isabella Serena Liso, Paolo Morelli, Mario Parise

Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari Aldo Moro

E-mail: piernicola.lollino@uniba.it

Parametric numerical analysis of the influence of environmental, geo-structural and geomechanical factors on the stability of soft rock sea cliffs

Parole chiave: erosione costiera, falesie, meccanica delle rocce, analisi numerica
Key words: coastal erosion, cliff, rock mechanics, numerical analysis

1. INTRODUZIONE

Le falesie rocciose costiere rappresentano sistemi dinamici naturali interessati da processi di origine ed intensità variabili, agenti a diverse scale spaziali e temporali. L'equilibrio delle pareti rocciose è infatti altamente suscettibile di variazioni delle condizioni al contorno, che possono essere rappresentate da fattori naturali, come ad esempio i regimi pluviometrici o il moto ondoso, o fattori antropici, come l'urbanizzazione delle aree costiere (Brooks & Spencer, 2010;

Andriani & Pellegrini, 2014; Sunamura, 2015; Castedo *et al.*, 2017; Prémaillon *et al.*, 2018). L'esposizione dell'ambiente antropizzato ai processi di instabilità costiera è in forte crescita negli ultimi decenni, sia per la crescente urbanizzazione che per lo sviluppo turistico pervasivo lungo le stesse aree, così che i processi di collasso delle falesie e l'arretramento costiero conseguente producono impatti negativi sempre crescenti in termini di perdite e danni all'ambiente, oltre che di rischio per la vita umana. Di conseguen-

za, valutazioni affidabili dell'evoluzione degli ambienti costieri caratterizzati da pareti rocciose sono cruciali per efficaci azioni di gestione del rischio e sviluppo sostenibile delle stesse aree.

I fenomeni di instabilità che interessano le pareti rocciose costiere sono rappresentati da movimenti di massa e processi erosivi, che inducono complessivamente l'arretramento costiero, sebbene a diversa velocità. Sunamura (2015) ha proposto una relazione della velocità di arretramento costiero valida



Figura 1. Settori di falesie in rocce tenere soggette a fenomeni di instabilità per crollo nell'area della Puglia meridionale

per i settori caratterizzati dalla presenza di falesie rocciose ed ha messo in luce i fattori predisponenti ed innescanti rispetto agli stessi processi di instabilità. La stabilità di questi sistemi deriva da numerosi fattori di controllo, come le caratteristiche geostrutturali degli ammassi, le proprietà fisiche e meccaniche delle litologie presenti e la relativa suscettibilità ai processi di *weathering* o di sola alterazione di natura marina o sub-aerea, l'azione del moto ondoso, o ancora le azioni naturali ed antropiche che comportano modifiche della geometria e dei carichi agenti sulla falesia. In particolare, la litologia gioca un ruolo dominante tra i fattori predisponenti, poiché caratteristiche meccaniche relativamente scadenti delle rocce e la suscettibilità alla degradazione degli stessi materiali possono favorire l'innescio e la propagazione di fratture negli ammassi. In simili contesti, l'eventuale esistenza di giunti e faglie può accelerare lo sviluppo degli stessi processi di instabilità e crollo (Trenhaile *et al.*, 1998; Anfuso *et al.*, 2013). Di contro, le condizioni meteorologiche, come gli eventi pluviometrici, gli stress termici, l'erosione marina, al pari delle sollecitazioni dinamiche prodotte dal moto ondoso nel lungo periodo, possono rappresentare fattori di innescio dei processi di instabilità delle falesie.

L'Italia meridionale è caratterizzata dalla presenza diffusa di aree costiere con falesie rocciose alte, spesso costituite da rocce tenere o molto tenere, che di frequente esibiscono processi di collasso di natura fragile, dunque senza segni precursori (Lollino *et al.*, 2021). In Fig. 1 sono riportati alcuni esempi di collassi di falesie costiere in rocce calcarenitiche tenere nell'area della costa orientale del Salento (Puglia meridionale).

D'altra parte, occorre ricordare come, dal punto di vista climatico, la regione del Mediterraneo rappresenta uno dei principali *hotspots* climatici del pianeta, nell'ambito del quale sia l'intensità sia la frequenza degli eventi meteorologici estremi sono previsti in aumento a causa dei ben noti cambiamenti climatici in corso.

Con riferimento specifico alle falesie in rocce tenere, Sunamura (1992, 2015) ha descritto i processi di arretramento, che generalmente seguono un andamento ciclico, con sviluppo di piattaforme alla base delle falesie, alternato all'erosione progressiva delle stesse piattaforme. L'arretramento delle falesie in roccia tenera è generalmente episodico ed evolve secondo crolli, scorrimenti

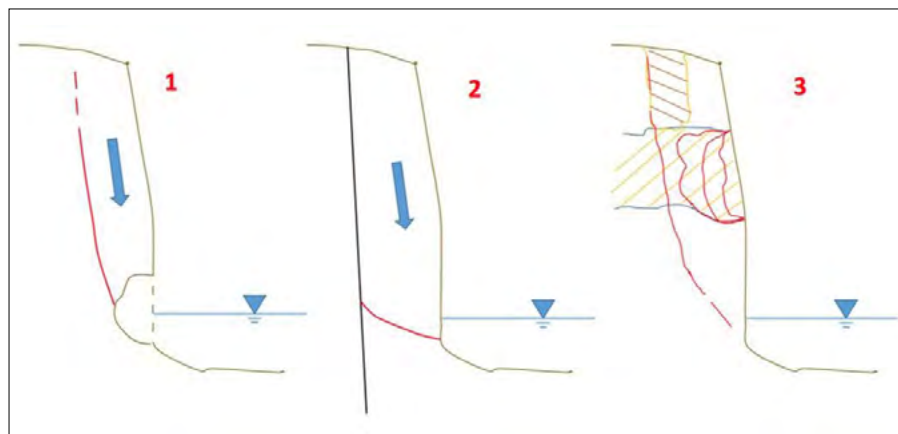


Figura 2. Meccanismi tipici di rottura di falesie in rocce tenere: 1) erosione al piede per effetto del moto ondoso e della presenza di solco di battente, 2) effetto di discontinuità sub-parallele alla falesia, 3) effetto di strati più teneri presenti lungo la parete rocciosa

o ribaltamenti progressivi, che spesso sono attivati da processi di erosione e sotto-escavazione al piede delle falesie, dovuti al moto ondoso, oppure sono accelerati per effetto della presenza di elementi strutturali o livelli litologici particolarmente deboli (Fig. 2). Le rocce tenere porose sono altamente suscettibili a processi di alterazione di natura ambientale conseguenti ai fenomeni di infiltrazione di acqua o di spray marino indotto dall'urto del moto ondoso nei confronti delle stesse falesie. D'altra parte, gli stessi impulsi prodotti dal moto ondoso, quando di entità significativa, possono essere all'origine della propagazione di fratture nell'ammasso roccioso. La degradazione delle rocce tenere porose è generalmente associata ai processi ciclici di essiccamento e di ri-umidificazione degli ammassi rocciosi (Ciantia *et al.*, 2015), nonché di cristallizzazione salina all'interno di rocce e fessure (Andriani & Walsh, 2007) e dissoluzione dovuta allo spray marino (Sunamura, 1992, 2015; Trenhaile, 1997; Stephenson & Naylor, 2010).

In questi contesti, gli approcci fenomenologici ed euristici, spesso utilizzati per affrontare simili problemi in passato, risultano di affidabilità relativa per la previsione dei processi di instabilità delle falesie, poiché questi stessi fenomeni si verificano come risultato di complesse interazioni tra i fattori di controllo di tipo meteo-marino e le condizioni geostrutturali e geo-meccaniche degli stessi ammassi rocciosi. A tal fine, i modelli di simulazione numerica offrono interessanti prospettive poiché sono in grado di simulare i processi fisici ed i loro effetti sui sistemi in esame su basi matematiche e quantitative maggiormente rigorose. In generale, l'affidabilità dei modelli di simulazione dipende dalla adeguatezza del modello costitutivo scelto per rocce e discontinuità, dall'implementazione

accurata della geometria della falesia, delle caratteristiche strutturali e delle condizioni al contorno, nonché dalla correttezza della simulazione dei processi fisico-ambientali agenti sulle falesie. Numerosi studi sono stati condotti recentemente sulle metodologie di acquisizione della geometria di dettaglio delle pareti rocciose mediante rilievi eseguiti con droni (*Unmanned Aerial Vehicles*, UAV), particolarmente utili soprattutto in aree difficilmente accessibili, e la successiva implementazione in modelli numerici tridimensionali per lo studio quantitativo della suscettibilità al collasso delle falesie rocciose (Mancini *et al.*, 2017; Fazio *et al.*, 2019; Perrotti *et al.* 2020; Loiotine *et al.*, 2021). Detti studi focalizzano l'attenzione soprattutto sullo sviluppo di procedure di analisi per l'acquisizione e l'elaborazione di dati ottenuti mediante rilievi UAV, il trattamento e l'importazione delle nuvole di punti acquisite in modelli numerici tridimensionali, l'elaborazione e l'interpretazione dei risultati degli stessi modelli di calcolo. Tali metodologie ben si adattano alle necessità di studio a scala locale, quindi di settori costieri di estensione limitata.

Il presente contributo intende fornire un inquadramento dei risultati di modelli numerici ideali in ambito bidimensionale di falesie in rocce tenere, con specifico riferimento agli effetti di processi ambientali, quali l'erosione al piede o il progressivo decadimento delle proprietà meccaniche del materiale roccioso ad opera degli agenti atmosferici, sulla variazione delle condizioni di equilibrio delle falesie rocciose. In particolare, sono presentati i risultati di modelli numerici continui agli elementi finiti, che utilizzano per la roccia modelli costitutivi a plasticità perfetta, e di modelli numerici ibridi FEM-DEM, di tipo continuo e discontinuo, che consentono

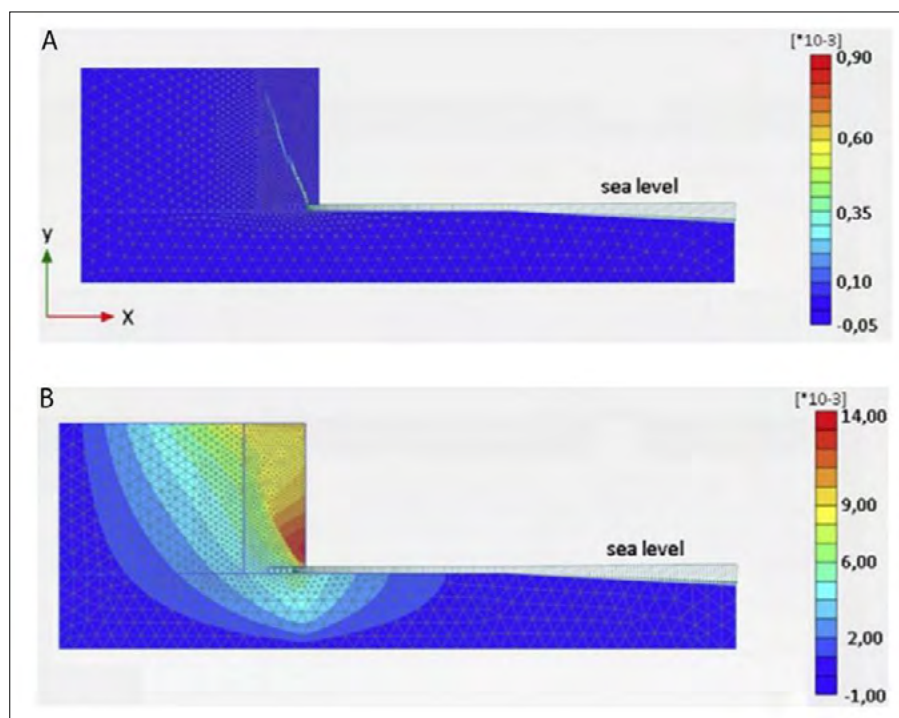


Figura 3. Analisi agli elementi finiti su falesia ideale, effetto dell'erosione al piede e della degradazione della roccia (Fazio et al. 2019): A) deformazioni deviatoriche; B) spostamenti orizzontali

di tener conto di aspetti complessi della meccanica delle rocce, quali il comportamento fragile degli stessi materiali e lo sviluppo di processi di propagazione delle fratture.

2. MODELLI NUMERICI IDEALI DI TIPO CONTINUO (FEM)

In questa sezione sono mostrati i risultati di modelli ideali continui, sviluppati con il metodo degli elementi finiti, per lo studio della suscettibilità al collasso di falesie in roccia tenera per effetto di processi quali l'erosione al piede indotta dal moto ondoso o il decadimento delle resistenze meccaniche degli strati più superficiali della roccia, prodotto da azioni ambientali come lo spray marino o l'infiltrazione delle acque meteoriche.

Assumendo condizioni di comportamento elastico-perfettamente plastico del materiale, Fazio *et al.* (2019) hanno infatti analizzato con il metodo degli elementi finiti (Plaxis 2D, 2018) l'effetto della erosione al piede su una falesia ideale di altezza pari a 12 m e, successivamente, l'effetto combinato dello stesso processo con una riduzione delle resistenze meccaniche del materiale. In particolare, nell'ipotesi di resistenze meccaniche non degradate, gli autori documentano come un'azione di semplice erosione al piede, anche dell'ordine di 3 m, non sia in grado di indurre instabilità dell'intera parete rocciosa, generando in questo caso solo una concentrazione di deformazioni deviatoriche al piede della falesia. Di contro, nell'ipotesi di erosio-

ne pari a 3 m combinata con una riduzione delle proprietà meccaniche della roccia (riduzione della coesione e della resistenza a trazione), i risultati numerici mostrano lo sviluppo di un processo di collasso generale che coinvolge l'intera parete rocciosa, indicato dal mancato raggiungimento della convergenza numerica. Tale meccanismo risulta accelerato in presenza di una frattura verticale a monte, ubicata ad una distanza di 5 m dalla parete stessa.

3. MODELLI NUMERICI IDEALI DI TIPO IBRIDO (FEM-DEM)

Negli ultimi anni hanno trovato progressiva diffusione i codici di calcolo ibridi ad elementi finiti/elementi distinti (FEM-DEM), in grado di simulare i processi di fratturazione della roccia indotti dalla risposta fragile del materiale in fase post-rottura (Munjiza, 2004). Tale tecnica numerica è in grado di combinare alcuni aspetti del metodo degli elementi finiti e del metodo degli elementi distinti con i principi della meccanica della frattura, al fine di simulare i meccanismi di propagazione della frattura nella roccia. In particolare, detti codici di calcolo sono in grado di simu-

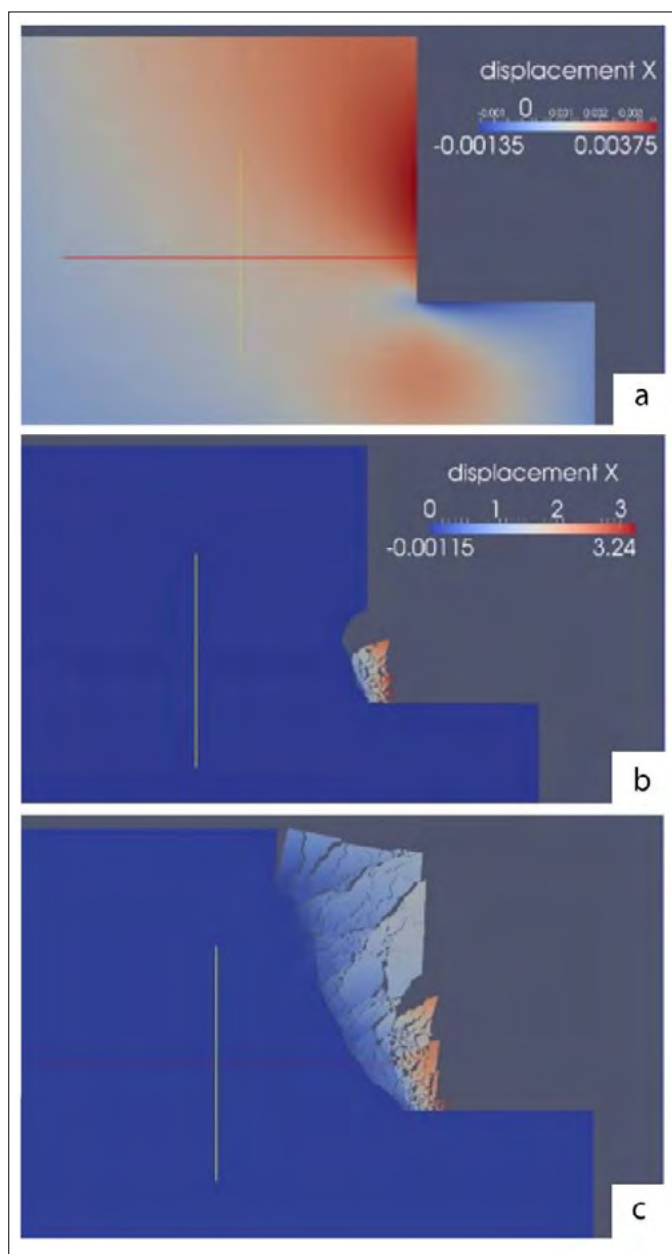
lare l'individuazione di nuove discontinuità nel mezzo roccioso ed i processi di interazione tra blocchi rocciosi, a partire da condizioni iniziali di mezzo continuo (Munjiza, 2004). Pertanto, questa tecnica numerica è in grado di seguire in modo più verosimile la risposta tenso-deformativa del materiale roccioso anche in fase post-rottura (Lollino & Andriani, 2017) e, quindi, consente di simulare i meccanismi di fratturazione sia per taglio sia per trazione.

Analisi numeriche di modelli ideali di falesie rappresentative di condizioni simili a quelle delle falesie di Melendugno (Salento leccese) sono state condotte con le tecniche FEM-DEM al fine di indagare gli effetti della fragilità del materiale sull'equilibrio complessivo delle pareti (IRAZU, Geomechanica Inc. 2016). In particolare, di seguito si riportano i risultati di analisi relative ad una parete ideale di 14 m di altezza, a partire da condizioni iniziali di ammasso roccioso continuo. I parametri di rigidità e resistenza scelti per la roccia, così come riportati in Tab. 1, sono stati dedotti sulla base di osservazioni di laboratorio, mentre i parametri di fragilità adottati nel calcolo ($G_{If} = 10 \div 50 \text{ N/m}$; $G_{IIf} = 100 \div 500 \text{ N/m}$) sono stati ipotizzati sulla base dei risultati di simulazioni FEM-DEM di prove di laboratorio, oltre che delle stesse evidenze di laboratorio. Al fine di ridurre al massimo eventuali rischi di dipendenza dei risultati dalla maglia di discretizzazione adottata, si è scelto di considerare una maglia particolarmente densa, costituita da elementi triangolari aventi un lato di 25 cm. Tale ipotesi ha comportato tempi computazionali particolarmente elevati.

I risultati di queste simulazioni sono riportati in Fig. 4, in termini di spostamenti orizzontali, al variare dei valori dei parametri di fragilità assunti per la roccia stessa, ed indicano che, assumendo condizioni di scarsa fragilità del materiale, la falesia non evidenzia condizioni di instabilità (Fig. 4a). L'assunzione di condizioni di fragilità media comporta invece l'innescio di rotture locali al piede, dovuto alla concentrazione di sforzi di taglio elevati nella stessa area (Fig. 4b), laddove condizioni di fragilità elevata conducono alla generazione di meccani-

Tabella 1. Parametri adottati per la roccia calcarenitica in condizioni umide nelle analisi FEM-DEM

γ (kN/m ³)	E' (MPa)	ν	c' (kPa)	ϕ' (°)	$\sigma\tau$ (kPa)
18	500	0,3	200	30	300



smi di collasso generali che coinvolgono l'intera parete rocciosa (Fig. 4c).

Le analisi numeriche hanno indagato anche l'effetto della presenza di giunti non-persistenti all'interno dell'ammasso roccioso, in combinazione con l'ipotesi di fragilità del materiale in accordo con quanto descritto precedentemente. In particolare, si è assunto un sistema di fratture discrete a franapoggio secondo lo schema parametrico riportato in Fig. 5, con inclinazione delle fratture pari a 40° sull'orizzontale e resistenza al taglio delle stesse pari a $\varphi = 30^\circ$. Inizialmente, si è ipotizzata una famiglia di giunti con bassi valori della spaziatura e della distanza tra giunti (spaziatura tra giunti $s = 5$ m, persistenza dei giunti $l = 5$ m, distanza tra vertici di giunti $b = 5$ m), mentre successivamente si è assunta una famiglia con discontinuità meno fitte ($s = 7$ m, $l = 3$ m, $b = 7$ m). I risultati numerici relativi al primo caso ($s = 5$ m, $l = 5$ m, $b = 5$ m) sono riportati in Fig. 6

e mostrano come, nel caso di modesta fragilità del materiale ($G_{If} = 50$ N/m – $G_{IIf} = 500$ N/m), il modello indichi un accumulo di spostamenti in accordo con l'inclinazione delle fratture, senza tuttavia generare un vero meccanismo di collasso. La rottura del versante è invece raggiunta nell'ipotesi di elevata fragilità della roccia ($G_{If} = 10$ N/m – $G_{IIf} = 100$ N/m), secondo un meccanismo caratterizzato da evidente anisotropia (meccanismo di rottura a gradoni). Nel caso di una famiglia di discontinuità con densità inferiore ($s = 7$ m, $l = 3$ m, $b = 7$ m), il risultato precedente è confermato, sebbene con un diverso meccanismo di rottura della parete.

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Le analisi numeriche discusse nel presente lavoro confermano ancora una volta il contributo di conoscenza dei processi naturali in esame che possono

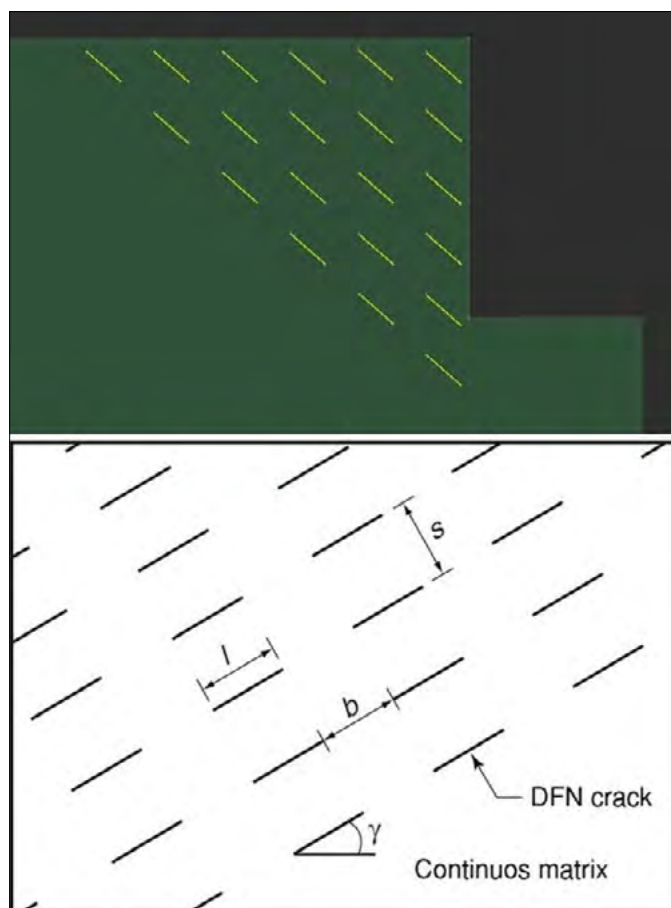


Figura 5. Modello schematico FEM-DEM per l'inserimento di sistemi di fratture non persistenti nell'ammasso.

Figura 4. Risultati modello FEM-DEM, a partire da condizioni iniziali di continuità, con diverso comportamento fragile del materiale: a) $G_{If} = 50$ N/m – $G_{IIf} = 500$ N/m; b) $G_{If} = 30$ N/m – $G_{IIf} = 300$ N/m; c) $G_{If} = 10$ N/m – $G_{IIf} = 100$ N/m.

offrire strumenti di calcolo come i modelli agli elementi finiti o, in alternativa, i modelli più sofisticati, come quelli basati sul metodo FEM-DEM.

I risultati delle analisi numeriche descritte in questo lavoro mostrano, infatti, gli effetti della combinazione di diversi fattori (fragilità della roccia, presenza di discontinuità e ponti di roccia, erosione al piede e degradazione meccanica della roccia) sulla stabilità globale delle pareti rocciose costiere e documentano il ruolo che rivestono i singoli fattori o, eventualmente, la loro combinazione. I modelli FEM-DEM sviluppati mettono in luce il ruolo non trascurabile del comportamento fragile del materiale roccioso, sebbene suggeriscano la necessità di trattare con cautela i risultati di analisi complesse, come quelle FEM-DEM presentate, poiché fortemente condizionate da parametri quali la dimensione della *mesh* di calcolo. Entrambe le tipologie di modelli

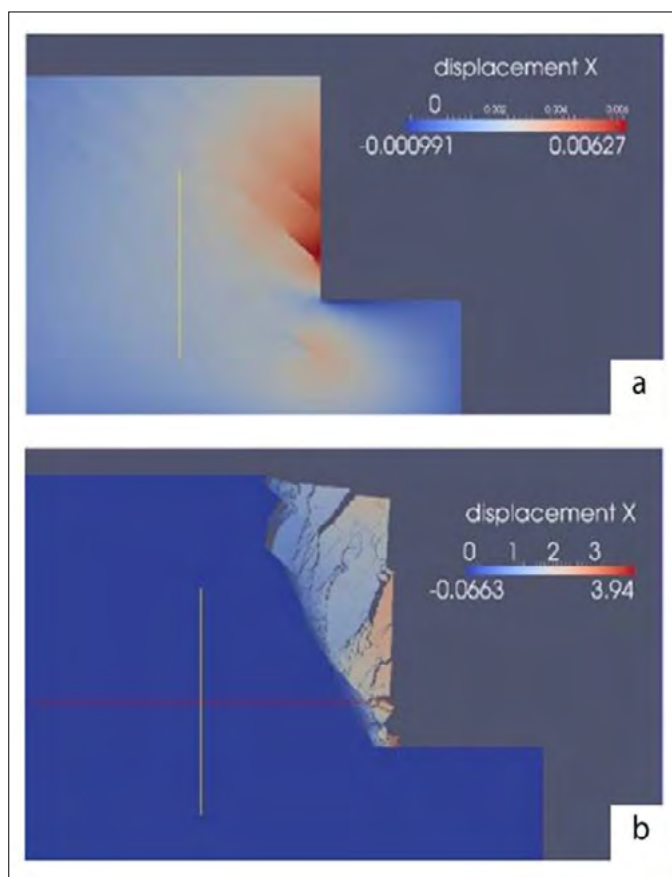


Figura 6. Risultati del modello FEM-DEM con famiglia di discontinuità ($s = 5$ m; $l = 5$ m; $b = 5$ m): a) $G_{If} = 50$ N/m – $G_{IIf} = 500$ N/m; b) $G_{If} = 10$ N/m – $G_{IIf} = 100$ N/m.

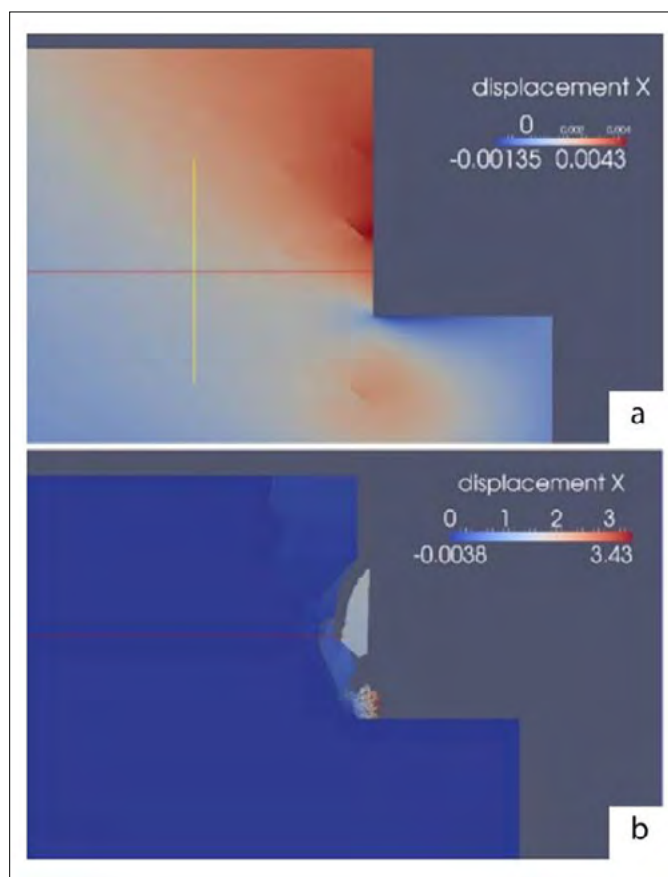


Figura 7. Risultati del modello FEM-DEM con famiglia di discontinuità ($s = 7$ m; $l = 3$ m; $b = 7$ m): a) $G_{If} = 50$ N/m – $G_{IIf} = 500$ N/m; b) $G_{If} = 10$ N/m – $G_{IIf} = 100$ N/m.

FEM e FEM-DEM confermano come i processi di collasso generale delle fallesie siano indotti dalla combinazione di azioni quali l'erosione al piede e la degradazione progressiva delle caratteristiche della roccia per effetto di agenti atmosferici. Inoltre, i risultati delle simulazioni confermano come la presenza di discontinuità nell'ammasso roccioso rappresenti un fattore di amplificazione e condizionamento dei meccanismi di rottura dei sistemi in esame.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ANDRIANI G.F. & PELLEGRINI V. (2014) *Qualitative assessment of the cliff instability susceptibility at a given scale with a new multidirectional method*. Int. J. Geol., 8, 73–82.
- ANDRIANI G.F. & WALSH N. (2007) *The effects of wetting and drying, and marine salt crystallization on calcarenitic rocks used as building material in historic monuments*. Geol. Soc. London, sp. publ. 271 (1), 179–188.
- ANFUSO G., GRACIA F.J. & BATTOCLETTI G. (2013) *Determination of cliffed coastline sensitivity and associated risk for human structures: a methodological approach*. J. Coast. Res., 29 (6), 1292–1296.
- BROOKS S.M. & SPENCER T. (2010) *Temporal and spatial variations in recession rates and sediment release from soft rock cliffs, Suffolk coast, UK*. Geomorphology, 124 (1–2), 26–41.
- CASTEDO R., PAREDES C., DE LA VEGA-PANIZO R. & SANTOS P.A.P. (2017) *The modelling of coastal cliffs and future trends*. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68445>.
- CIANTIA M.O., CASTELLANZA R. & DI PRISCO C. (2015) *Experimental study on the water-induced weakening of calcarenites*. Rock Mech. Rock Eng., 48 (2), 441–461.
- FAZIO N.L., PERROTTI M., ANDRIANI G.F., MANCINI F., ROSSI P., CASTAGNETTI C. & LOLLINO P. (2019) *A new methodological approach to assess the stability of discontinuous rocky cliffs using in-situ surveys supported by UAV-based techniques and 3-D finite element model: a case study*. Engineering Geology, 260.
- GEOMECHANICA INC. (2016) *Irazu Software, Version 3.0*.
- LOIOTINE L., ANDRIANI G.F., JABOYEDOFF M., PARISE M. & DERRON M.H. (2021) *Comparison of remote sensing techniques for geostructural analysis and cliff monitoring in coastal areas of high tourist attraction: the case study of Polignano a Mare (Southern Italy)*. Remote Sensing, 13 (24), 5045.
- LOLLINO P. & ANDRIANI G.F. (2017) *Role of brittle behaviour of soft calcarenites under low confinement: laboratory observations and numerical investigation*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 50, 1863–1882.
- LOLLINO P., PAGLIARULO R., TRIZZINO R., SANTALOA F., PISANO L., ZUMPARO V., PERROTTI M., FAZIO N.L. (2021). *Multi-scale approach to analyse the evolution of soft rock coastal cliffs and role of controlling factors: a case study in south-eastern Italy*. Geomatics, Natural Hazards and Risk, vol. 12, n. 1, 1058–1081.
- MANCINI F., CASTAGNETTI C., ROSSI P., DUBBINI M., FAZIO N.L., PERROTTI M. & LOLLINO P. (2017) *An integrated procedure to assess the stability of coastal rocky cliffs: from UAV close-range photogrammetry to geomechanical finite element modelling*. Remote Sensing, 9, 1235.
- MUNJIZA A. (2004) *The Combined Finite-Discrete Element Method*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- PERROTTI M., GODONE D., ALLASIA P., BALDO M., FAZIO N.L., LOLLINO P. (2020). *Investigating the susceptibility to failure of a rock cliff by integrating Structure-from-Motion analysis and 3D geomechanical modelling*. Remote Sensing, 12, 3994; doi: 10.3390/rs12233994.
- PLAXIS-2D (2018) *User's manual*. Plaxis-BV, The Netherlands.
- PREMAILLON M., REGARD V., DEWEZ T.J.B. & AUDA Y. (2018) *GlobR2C2 (Global Recession Rates of Coastal Cliffs): a global relational database to investigate coastal rocky cliff erosion rate variations*. Earth Surf. Dynam., 6 (3), 651–666.
- STEPHENSON W. & NAYLOR L. (2010) *Rock coast geomorphology*. Geomorphology, 114 (1–2), 1–100.
- SUNAMURA T. (1992) *Geomorphology of rocky coasts*. Wiley & Sons, Chichester, UK, 314 pp.
- SUNAMURA T. (2015) *Rocky coast processes: with special reference to the recession of soft rock cliffs*. Proc. Japan Acad., Ser B Phys. Biol. Sci., 91 (9), 481–500.
- TRENHAILE A.S. (1997) *Coastal dynamics and landforms*. Oxford (UK), Oxford University Press, 366 pp.

Mitigazione del rischio da dissesti in un'area a forte valenza turistica ed archeologica: Roca Vecchia e Grotte della Poesia (Melendugno, Puglia)

Mitigating the landslide risk in areas of high touristic and archaeological relevance: Roca Vecchia and Grotte della Poesia (Melendugno, Apulia)

Parole chiave: erosione costiera, falesie, carsismo, sinkhole
Key words: coastal erosion, cliff, karst, sinkhole

Giuseppe Mastronuzzi¹, Paolo Sansò², Giovanni Scicchitano¹, Isabella Serena Liso¹, Sven Bertelmann³, Andrea Marassich³, Mario Parise^{1*}

¹ Dipartimento Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi "Aldo Moro" di Bari

² Università del Salento, Lecce

³ Phreatic

E-mail: mario.parise@uniba.it

INTRODUZIONE: IL PAESAGGIO COSTIERO

Il litorale adriatico pugliese offre numerosi tratti di notevole attrazione turistica data la bellezza paesaggistica dei luoghi, a cui si combinano di frequente siti di grande importanza archeologica. Il territorio di Melendugno (litorale Adriatico, provincia di Lecce), con il promontorio su cui insiste il centro fortificato di Roca Vecchia (De Giorgi, 1922; Pagliara, 1987, 2001; Scarano, 2010) è certamente tra quelli di maggiore interesse. I depositi carbonatici sono fortemente affetti da fenomeni carsici e interessati da erosione e crolli; questa situazione rende problematica la gestione del territorio, data anche la forte vo-

cazione turistica, specie nel corso della stagione estiva.

Il tratto di costa adriatica compreso tra San Foca a Otranto (al cui interno ricade il sito in esame) è modellato interamente su depositi della Formazione di Uggiano, del Pliocene medio-superiore (Bossellini *et al.*, 1999; Bossio *et al.*, 2005). Gli strati mostrano spessori in genere limitati (0,5-1,5 m), con subordinata presenza di banchi a maggiore spessore. La complessiva erodibilità è elevata; la differenza nella risposta all'erosione tra strati più grossolani (calcareniti) e più fini (calclutiti) determina la sporgenza dei primi rispetto ai secondi, il che costituisce un elemento predisponente ai fenomeni di instabilità lungo le falesie.

L'area è interessata da sistemi di faglie NNW-SSE e NW-SE, con deciso approfondimento del substrato carbonatico mesozoico, affiorante estesamente poco all'interno.

Il locale paesaggio costiero è segnato dalla presenza di 6 ordini di terrazzi, tra 103 m s.l.m. e pochi metri di quota. Di probabile origine marina, essi sono ampi 2-3 km e si presentano separati da basse paleo-falesie degradate e dissecate da brevi incisioni fluviali. Queste ultime raramente interessano più di un ordine di terrazzo, ad eccezione del reticolo idrografico ben organizzato, ricordato ad una linea di riva oggi sommersa (Sansò *et al.*, 2016). La genesi delle principali insenature presenti nell'area

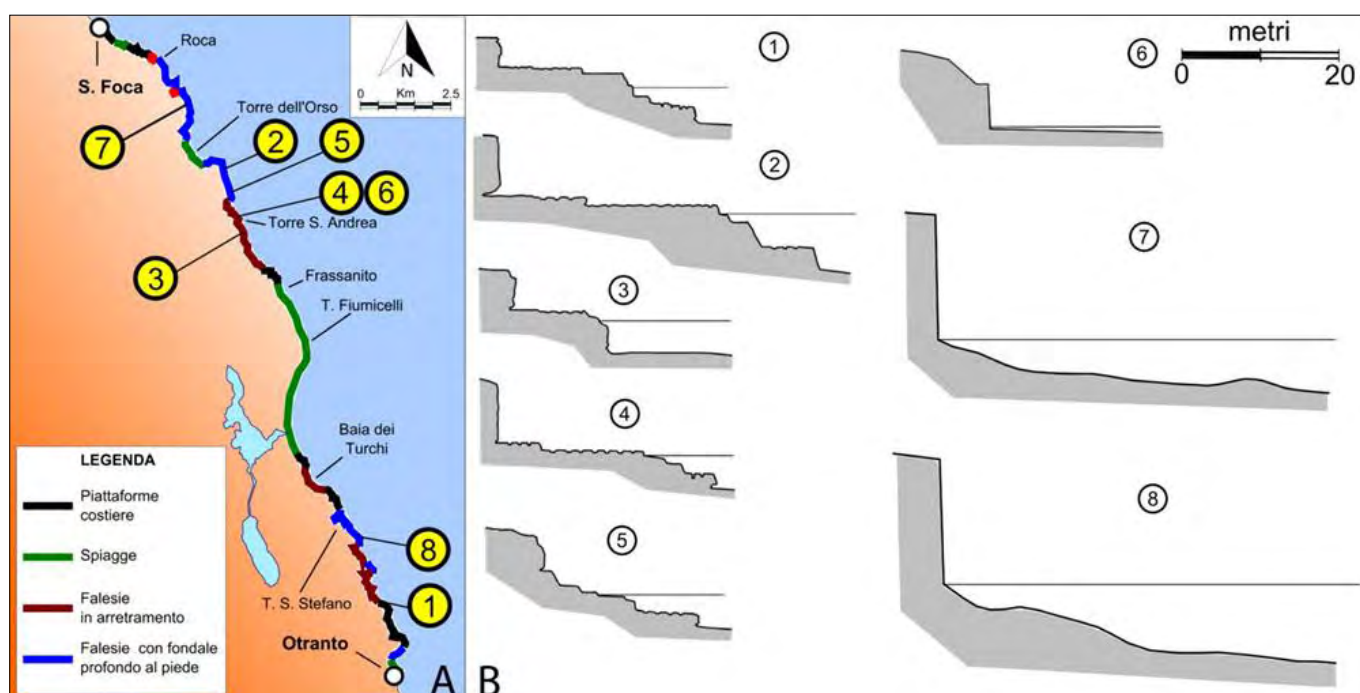


Figura 1. A sinistra: morfologia della costa tra San Foca e Otranto (i numeri in cerchietto indicano la posizione dei profili morfologici riportati negli schemi a destra). A destra: profili caratteristici delle falesie (da Sansò, 2021)

è legata alla rielaborazione di valli rettilinee da parte dei processi erosivi marini. Localmente, la monotonia morfologica dei terrazzi è interrotta da depressioni allungate NNW-SSE (Mastronuzzi *et al.*, 2017), le più profonde delle quali ospitano i Laghi Alimini. Sullo stesso allineamento si individuano il Canale del Brunese e la Palude dei Tamari. La genesi di queste depressioni, così come il basculamento di alcune superfici terrazzate, sarebbe da imputare ad una recente attività tettonica nell'area.

Il paesaggio costiero comprende tre tipi morfologici principali: spiagge, piattaforme costiere e falesie. Spiagge di estensione limitata comprese tra punte rocciose (*pocket beach*) si rilevano nei dintorni di S. Foca e nelle insenature di Torre dell'Orso e Otranto (Fig. 1). In alcuni tratti, le piattaforme costiere costituiscono un elemento di transizione tra spiagge e falesie, e derivano dalla forte erosione di una spiaggia con la conseguente riesumazione del substrato roccioso. Le falesie, invece, sono molto diffuse e si presentano con pareti subverticali alte sino a 17 m, spesso con profondi solchi di battente al piede e interessate da ampie grotte di modellamento marino. I tratti in più veloce arretramento sono segnati da archi costieri e faraglioni.

A loro volta, le falesie dell'area di studio possono essere suddivise in tre gruppi in funzione della loro morfologia. Il primo gruppo comprende le falesie con piede profondo (*plunging cliff*), costituite da una parete sub-verticale che si spinge ben al di sotto del livello del mare (Sansò *et al.*, 2016). Queste sono caratterizzate da una lenta evoluzione connessa prevalentemente a processi di tipo carsico e subordinatamente a processi di degradazione. I primi determinano lo sviluppo di ampie cavità in corrispondenza del livello medio del mare lungo superfici di strato e di frattura. L'azione erosiva del moto ondoso sulla superficie della falesia è trascurabile a causa della riflessione dei fronti d'onda incidenti. Le falesie del secondo gruppo sono contraddistinte dalla presenza di piattaforme costiere sia al di sopra che al di sotto del livello del mare. Il tratto subaereo delle falesie è a luoghi contraddistinto dalla presenza di piattaforme ampie sino a 40 m e poste sino a 3 m di quota (Fig. 2). Le piattaforme determinano una protezione naturale contro l'azione erosiva del moto ondoso incidente cosicché le falesie di questo gruppo sono le più stabili nell'area e vengono a costituire dei piccoli promontori. Il terzo gruppo, infine,



Figura 2. Vista della piattaforma costiera a S di Torre dell'Orso (tipologia n. 2 e 5 in Fig. 1)

comprende le falesie con al piede una piattaforma poco profonda debolmente inclinata verso mare. L'angolo di raccordo tra la superficie della falesia e quella della piattaforma è grossomodo posto in corrispondenza del livello medio del mare. Esse sono in rapido arretramento a causa di frane da crollo indotte dal modellamento di profondi solchi di battente e cavità in corrispondenza del livello del mare. Lo sviluppo di queste cavità è principalmente connesso al miscelamento di acque dolci freatiche con acque marine, che produce una miscela in grado di dissolvere il substrato roccioso carbonatico in modo più efficace, determinando processi di ipercarsismo (Delle Rose & Parise, 2005).

ELEMENTI CARSICI DEL TERRITORIO

Il territorio di Melendugno è fortemente condizionato dallo sviluppo di processi carsici, che hanno determinato la genesi di numerose forme del paesaggio, sia in superficie che nel sottosuolo; esso, infatti, presenta un elevato numero di cavità naturali. Gran parte delle grotte si concentra lungo la linea di costa e nei suoi immediati dintorni, costituendo una delle principali attrazioni della zona. Dalla consultazione del Catasto delle Grotte Naturali e delle Cavità Artificiali, curato dalla Federazione Speleologica Pugliese e consultabile all'indirizzo internet <http://www.catasto.fspuglia.it>, nel territorio comunale di Melendugno risultano censite, rispettivamente, 15 grotte naturali e 6 cavità artificiali (Tab. 1). Queste ultime risultano di particolare importanza storico-

culturale e religiosa in una regione come la Puglia, caratterizzata da moltissime cavità scavate dall'uomo nell'ammasso roccioso calcarenitico (Fonseca, 1980, 1991; Dell'Aquila & Messina, 1998), che spesso risultano interessate da situazioni critiche in merito alla instabilità (Cotecchia & Grassi, 1997; Parise, 2015). In aggiunta a quelle riportate nel Catasto Regionale delle Grotte, sono da segnalare altre cavità presenti nella baia di Torre dell'Orso: dalla Grotta di S. Cristoforo e il cavernone nei suoi pressi, alle cavità artificiali poste sul fianco N della baia.

La Grotta dello Speciale (PU 126) è sita negli immediati pressi del promontorio di Roca Vecchia, poco a N di questo. Consentendo l'accesso diretto al mare, è di frequente visitata da turisti nel corso della stagione estiva; essa termina in un ampio cavernone, parzialmente allagato, a diretto collegamento con il mare. L'ingresso avviene attraverso un dromos orientato N-S, dal quale si giunge a un cunicolo artificiale che consente il passaggio in piedi, orientato N060, sino ad arrivare al mare (Fig. 3).

Tra le altre cavità, meritano certamente un cenno, per quanto riguarda l'importanza idrogeologica dei luoghi, le Grotte dell'Acqua Dolce (PU 169-173), una serie di 5 cavità che si aprono al margine inferiore della falesia a S della baia di Torre dell'Orso e che derivano il loro nome dalla presenza di acqua dolce che scaturisce dalle fratture della roccia all'interno delle cavità. Tali venute d'acqua, di non grande entità, sono da porre in relazione alla presenza di livelli meno permeabili nella successione stra-

Tabella 1. Elenco delle cavità censite nel territorio di Melendugno

Nome	Numero catastale	Latitudine	Longitudine	Tipologia
Grotta dello Speziale (o dei Fidanzati)	PU 126	N 40.2884222	18.4250722	N
Grotta della Poesia Grande	PU 127	N 40.286178	18.429380	N
Grotta della Poesia piccola	PU 128	N 40.285400	18.430397	N
Grotta della prima spiaggia (Grotta di Mafar)	PU 166	N 40.24965	18.4472333	N
Grotta dello Mbruficu	PU 167	N 40.2514833	18.4470333	N
Grotta del Pepe	PU 168	N 40.2558	18.4451333	N
Grotta dell'Acqua Dolce 1	PU 169	N 40.2607333	18.4438333	N
Grotta dell'Acqua Dolce 2	PU 170	N 40.2615833	18.4434333	N
Grotta dell'Acqua Dolce 3	PU 171	N 40.2641666	18.4426666	N
Grotta dell'Acqua Dolce 4	PU 172	N 40.2655666	18.4418833	N
Grotta dell'Acqua Dolce 5 (Grotta Ronzu Beddu)	PU 173	N 40.2666333	18.44175	N
Grotta del Canale	PU 174	N 40.2566	18.4443833	N
Grotta delle Streghe (Moniche)	PU 175	N 40.2794674	18.4313484	N
Grotta Torre dell'Orso	PU 532	N 40.27625	18	N
Grotta Mariano	PU 1538	N 40.2667388	18.4272833	N
Cripta anonima in via Vicinale Mancarella	PU CA 956	N 40.2839944	18.4079	CA
Cavità sotto il ponte di Torre dell'Orso	PU CA 957	N 40.2697772	18.4295227	CA
Villaggio rupestre c/o Torre di S. Foca	PU CA 958	N 40.30215	18.4052444	CA
Villaggio rupestre di Roca	PU CA 959	N 40.2872055	18.42545	CA
Varie cavità lungo costone di S. Andrea	PU CA 960	N 40.2547611	18.4450722	CA
Varie cavità su costone a NW di palude Cassano	PU CA 961	-	-	CA

Fonte: dati dal Catasto delle Grotte e delle Cavità Artificiali della Regione Puglia, a cura della Federazione Speleologica Pugliese (<http://www.catasto.fsipuglia.it>).

Legenda colonna tipologia: N = grotta naturale; CA = cavità artificiale

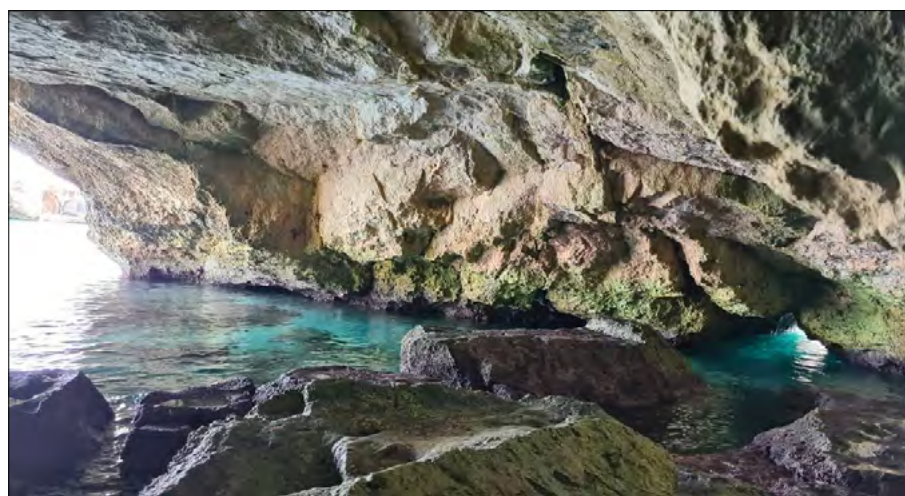


Figura 3. Veduta interna di Grotta dello Speziale (PU 126 nel Catasto Regionale delle Grotte), una delle tante cavità che caratterizzano il litorale di Melendugno

tigrafica (Bossio *et al.*, 1985, 2005; Margiotta & Negri, 2005). Ulteriori emergenze d'acqua nei dintorni determinano la deposizione di travertini, nonché la formazione di rivoli e vaschette allagate lungo la limitrofa piattaforma costiera, creando paesaggi di notevole interesse naturalistico, che si aggiungono alle altre forme carsiche presenti, quali marmitte di erosione e vaschette di dissoluzione.

Il sistema delle Grotte della Poesia (Beccarisi *et al.*, 2003; Delle Rose & Parise, 2005), posizionato sul promontorio a S della zona archeologica di Roca Vec-

chia, comprende i due *sinkhole* da collasso di Grotta della Poesia Grande (PU 127) e Grotta della Poesia Piccola (PU 128), nonché i passaggi di collegamento tra questi, e tra essi e il mare. Esso certamente costituisce il sito più noto, anche e soprattutto a livello turistico (Fig. 4).

In aggiunta alle grotte e cavità artificiali, tra gli altri aspetti carsici di sicuro interesse (Rudnicki, 1980) nella fascia costiera di Melendugno vi sono numerosi pozzetti carsici, particolarmente concentrati nel settore nei dintorni delle Grotte della Poesia, con grande

varietà di forme. Già esaminati in numerosi studi scientifici negli scorsi anni (Marsico *et al.*, 2003; De Waele *et al.*, 2011), rappresentano strutture di grande interesse per la comprensione della evoluzione geomorfologica e carsica del territorio, al pari di simili strutture individuate in varie altre parti del mondo (Falcon, 1929; James, 1972; Coetzee, 1975; Morawiecka & Walsh, 1997; De Waele *et al.*, 2011). Nel sito archeologico di Roca Vecchia, tali pozzetti sono stati anche oggetto di scavi archeologici (Blanc & Cardini, 1961; Pagliara, 1987, 2001; Scarano, 2010, 2019). La maggiore diffusione di tali strutture (con forme molto belle ai bordi della falesia, ove si possono osservare le massime profondità dei pozzetti, che si spingono sino a 3 m) si osserva nel tratto di costa a sud del sistema delle Grotte della Poesia (Fig. 5).

INSTABILITÀ DELLE FALESIE COSTIERE

Da molti anni, l'intero litorale di Melendugno è oggetto di studi relativi alla instabilità delle falesie ed alla presenza di fenomeni di sprofondamento, come dimostrano gli studi pregressi disponibili sul tema (Delle Rose & Parise, 2004, 2005; Leucci & Carrozzo, 2008).



Figura 4. Grotta della Poesia Grande in periodo estivo, affollata di bagnanti, che tendono a concentrarsi presso il margine settentrionale del sinkhole, dove lo spessore della volta rocciosa raggiunge i valori minimi



Figura 5. Pozzetti di dissoluzione carsica nei pressi della falesia di Roca

Tra questi, sulla base dello studio multi-temporale eseguito su fotografie aeree, Delle Rose & Parise (2005) hanno documentato 29 eventi nel periodo 1943-1996 (con media superiore a 1 evento ogni 2 anni). Dopo il 1996, ulteriori fenomeni hanno riguardato il litorale, con ripetute instabilità, ad esempio, nella zona di San Foca; il crollo più recente è stato registrato sul lato sud dell'area archeologica di Roca Vecchia nel luglio 2022. Lollino *et al.* (2021) hanno condotto uno studio basato sull'analisi multi-temporale (1954-2017), per il tratto costiero compreso tra la zona sud di Torre dell'Orso e Torre S. Andrea, evidenziando cambiamenti significativi nei tratti di costa esaminati, con massimo arretramento della linea di costa nel periodo 1987-2006 in alcuni punti della zona di Torre S. Andrea.

Gli eventi di instabilità sono innescati dallo scalzamento alla base conseguente alla presenza del solco di battente, o di livelli stratigrafici a maggiore erodibilità. Le concavità, nell'ordine di qualche decimetro, fanno mancare il

supporto agli strati sovrastanti. L'erosione ad opera del moto ondoso ulteriormente interviene per favorire il distacco di porzioni dell'ammasso roccioso.

I fenomeni di instabilità consistono in diverse tipologie di eventi, essenzialmente per crolli e ribaltamenti, e in maniera subordinata per scivolamenti (traslativi o a cuneo), in funzione dei locali caratteri morfologici.

Tra i settori maggiormente interessati da movimenti in massa a causa del moto ondoso, vi è l'insenatura della Zolfara, immediatamente a nord dell'abitato di Roca (Fig. 6): essa presenta falesie mediantemente di pochi metri di altezza, che mostrano numerose tracce di attività antropica, quali tagli artificiali e resti di cave, e sono intensamente interessate da frane costiere, principalmente sotto forma di ribaltamenti, che determinano il progressivo arretramento della falesia, sino localmente ad arrivare a poca distanza dalla SP 366. Fratture beanti marginano in più punti lo sviluppo della baia, in particolare alla spiaggia di Punta Sapone, a testimonianza della continua

evoluzione dell'instabilità, nonostante siano state realizzate barriere frangiflutti e di protezione con blocchi rocciosi di grosse dimensioni.

Tra il promontorio di Roca Vecchia e il sito delle Grotte della Poesia il litorale è segnato in più punti da frane, incluse le più recenti, avvenute a luglio 2022 sul margine sud della zona archeologica. Il progredire dei fenomeni di instabilità, in conseguenza di mareggiate e di azioni particolarmente intense del moto ondoso, mette a repentaglio le strutture archeologiche più prossime alla costa, al pari dei settori prospicienti a Grotta della Poesia Grande. Ulteriori settori a potenziale pericolo sono poi rappresentati dalla baia di Torre dell'Orso, con particolare riferimento al margine meridionale, ove insiste la Grotta di San Cristoforo. Qui sono presenti numerosi blocchi in precario equilibrio, su un litorale che d'estate accoglie moltissimi bagnanti.

Oltre che da movimenti di versante, l'intero litorale è segnato da sprofondamenti, i cui più noti esempi sono costi-



Figura 6. Fenomeni di frana lungo il litorale nei pressi dell'abitato di Roca

tuiti dai *sinkhole* da collasso (Gutierrez *et al.*, 2014; Parise, 2019, 2022) del sistema carsico delle Grotte della Poesia (Delle Rose & Parise, 2005; Liso & Parise, 2023). Sprofondamenti di minore entità, e che potenzialmente possono minacciare le infrastrutture della zona, risultano comunque frequenti (Fiore & Parise, 2013; Vennari & Parise, 2022), e costituiscono il principale elemento di instabilità geomorfologica lungo l'intero litorale adriatico salentino (Margiotta & Parise, 2019; Margiotta *et al.*, 2021).

Fenomeni di sprofondamento, connessi essenzialmente a collassi della volta soprastante cavità carsiche, o originati da processi di suffosione con richiamo verso il basso del materiale di riempimento o di copertura (Gutierrez *et al.*, 2014; Parise, 2019, 2022), sono infatti alquanto frequenti lungo la costa adriatica, in varie condizioni di altezza delle falesie. Tra i casi che di recente hanno creato mag-

giore allarme, vi è il *sinkhole* che si è formato nella baia di Porto Ligno, al margine meridionale dell'abitato di Roca, in data compresa tra luglio 2018 e giugno 2020 (Fig. 7). L'analisi multi-temporale delle ortofoto disponibili ha evidenziato in questo caso che esistevano tracce in superficie, che indicavano la possibilità dello sprofondamento, già a partire dal 2015. Il *sinkhole* è stato originato da una cavità presente al livello del mare, che è stata erosa dal basso a causa del moto ondoso. La calcarenite, qui caratterizzata da non elevata resistenza, con presenza anche di sabbie e terra rossa, in parte derivanti dal disfacimento dell'ammasso roccioso, è sprofondata, creando una voragine larga circa 4 x 5 m, profonda 5,8 m, e che presenta fenomeni di ampliamento per erosione soprattutto in corrispondenza dello spigolo NE. Il *sinkhole* costituisce un indubbio pericolo, soprattutto in occasione della stagione estiva.

CONCLUSIONI

Data l'elevata attrattività turistica dell'area, il litorale di Melendugno, incluse le numerose cavità ivi presenti (a cominciare dalla più nota e frequentata, Grotta della Poesia Grande), presenta numerose situazioni di rischio, connesse alla instabilità delle falesie costiere e alla suscettibilità a fenomeni di sprofondamento carsico. Il monitoraggio delle situazioni che mostrano evoluzione più rapida, e che minacciano infrastrutture ed abitazioni, risulta pertanto necessario, ai fini della salvaguardia della incolumità pubblica e privata. La regolamentazione degli accessi a siti estremamente fragili, come il complesso di *sinkholes* di Grotte della Poesia, da pochi anni introdotta dal Comune di Melendugno nel periodo estivo, rappresenta certamente una azione valida dal punto di vista della preservazione del sito naturale. Al fine di aumentare la mitigazione del rischio da crolli e collassi delle falesie la regolamentazione dovrebbe essere affiancata da ulteriori azioni, dedicate al monitoraggio con moderne tecnologie delle situazioni a maggiore rischio, ma anche volte alla sensibilizzazione della popolazione residente e turistica.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- BAKALOWICZ M. (2005), *Karst groundwater: A challenge for new resources*. Hydrogeology Journal, 13 (1), 148-160.
- BECCARISI L., CACCIATORE G., CHIRIACÒ L., DELLE ROSE M., FIORITO F., GIURI F., LISI G., MARRAS V. & QUARTA G. (2003), *Influenza del carsismo sulla falesia e negli ipogei di Rocavecchia*. Thalassia Salentina, 26, 155-163.
- BLANC A.C. & CARDINI L. (1961), *Saggi nei pozzetti di erosione del 'tufo' di Roca Vecchia (Lecce)*. Quaternaria, 5, 306-308.
- BOSELLINI A., BOSELLINI F.R., COLALONGO L., PARENTE M., RUSSO A. & VESCOGNI A.



Figura 7. Il sinkhole di Porto Ligno

- (1999), *Stratigraphic architecture of the Salento coast from Capo d'Otranto to S. Maria di Leuca (Apulia, Southern Italy)*. Rivista Italiana Paleontol. Stratigrafia, 105 (3), 397–416.
- BOSSIO A., LANDINI V., MAZZEI R., SALVATORINI G. & VAROLA A. (1985), *Studi sul Neogene e Quaternario della Penisola Salentina. I – La sequenza pliocenica di S. Andrea (Lecce) ed il suo contenuto in pesci, ostracodi, foraminiferi e nannofossili*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., 92, 35–93.
- BOSSIO A., MAZZEI R., MONTEFORTI B. & SALVATORINI G. (2005), *Stratigrafia del Neogene e Quaternario del Salento Sud-Orientale*. Geol. Romana, 38, 31–60.
- COETZEE F. (1975), *Solution pipes in coastal aeolianites of Zululand and Moçambique*. Transactions of the Geological Society of South Africa, 78, 323–333.
- COTECCHIA V. & GRASSI D. (1997), *Incidenze geologico-ambientali sull'ubicazione e lo stato di degrado degli insediamenti rupestri medioevali della Puglia e della Basilicata*. Geol. Appl. Idrogeol., 32, 1–10.
- DE GIORGI C. (1922), *Descrizione fisica, geologica e idrografica della Provincia di Lecce*.
- DELL'AQUILA F. & MESSINA A. (1998), *Le chiese rupestri di Puglia e Basilicata*. Mario Adda editore, Bari, 277 pp.
- DELLE ROSE M. & PARISE M. (2004), *Slope instability along the Adriatic coast of Salento, southern Italy*. Atti IX Int. Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, 1, 399–404.
- DELLE ROSE M. & PARISE M. (2005), *Speleogenesis e geomorfologia del sistema carsico delle grotte della poesia nell'ambito dell'evoluzione quaternaria della costa adriatica salentina*. Atti e Memorie della Commissione Grotte “E. Boegan”, 40, 153–173.
- DE WAELE J., LAURITZEN S.E. & PARISE M. (2011), *On the formation of dissolution pipes in Quaternary coastal calcareous arenites in Mediterranean settings*. Earth Surface Processes and Landforms, 36, 143–157.
- DE WAELE J., GUTIÉRREZ F., PARISE M. & PLAN L. (2011), *Geomorphology and natural hazards in karst areas: A review*. Geomorphology, 134 (1–2), 1–8.
- FALCON N.L. (1929), *Pipes in coast sandstones*. The Geological Magazine, 66, 48.
- FIGIORE A. & PARISE M. (2013), *Cronologia degli eventi di sprofondamento in Puglia, con particolare riferimento alle interazioni con l'ambiente antropizzato*. Mem. Descr. Carta Geol. It., 93, 239–252.
- FONSECA C.D. (1980), *La civiltà rupestre in Puglia*. In: FONSECA C.D. (Ed.), *Civiltà e culture in Puglia. La Puglia fra Bisanzio e l'Occidente*. Electa Editrice, Milano, 37–116.
- FONSECA C.D. (1991), *Le grotte della civiltà rupestre*. Itinerari Speleologici, ser. II, 5, 13–25.
- FORD D. & WILLIAMS P. (2007), *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley & Sons.
- GOLDSCHIEDER N., CHEN Z., AULER A. S., BAKALOWICZ M., BRODA S., DREW D., HARTMANN J., JIANG G., MOOSDORF N., STEVANOVIC Z. & VENI G. (2020), *Global distribution of carbonate rocks and karst water resources*. Hydrogeology Journal, 28, 1661–1677.
- GUTIERREZ F., PARISE M., DE WAELE J. & JOURDE H. (2014), *A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst*. Earth Sci. Rev., 138, 61–88.
- JAMES N.P. – (1972). *Holocene and Pleistocene calcareous crust (caliche) profiles: criteria for subaerial exposure*. J. Sedimentary Petrology, 42, 817–836.
- KLIMCHOUK A., FORD D.C., PALMER A.N. & DREYBRODT W. (2000), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. National Speleological Society, Huntsville. 444 p.
- LEUCCI G. & CARROZZO M.T. (2008), *Valutazione quantitativa della stabilità della falda in prossimità della Grotta della Poesia*. Bollettino Geofisica, 1–4, 35–50.
- LISO I.S. & PARISE M. (2023), *Sinkhole development at the freshwater-saltwater interface in Apulia (Southern Italy)*. Proceedings 17th Sinkhole Conference, Tampa, Florida (USA), March 27–31, 2023.
- LOLLINO P., PAGLIARULO R., TRIZZINO R., SANTALOA F., PISANO L., ZUMPARO V., PERROTTI M. & FAZIO N.L. (2021), *Multiscale approach to analyse the evolution of soft rock coastal cliffs and role of controlling factors: a case study in South-Eastern Italy*. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 12 (1), 1058–1081.
- MARGIOTTA S. & NEGRI S. (2005), *Alla ricerca dell'acqua perduta*. Congedo Ed.
- MARGIOTTA S. & PARISE M. (2019), *Hydraulic and geomorphological hazards at wetland geosites along the Eastern coast of Salento (SE Italy)*. Geoheritage, 11, 1655–1666.
- MARGIOTTA S., MARINI G., FAY S., D'ONGHIA F.M., LISO I.S., PARISE M. & PINNA M. (2021), *Hydro-stratigraphic conditions and human activity leading to development of a sinkhole cluster in a Mediterranean water ecosystem*. Hydrology, 8, 111.
- MARSICO A., SELLERI G., MASTRONUZZI G., SANSÒ P. & WALSH N. (2003), *Cryptokarst: a case-study of the Quaternary landforms of southern Apulia (southern Italy)*. Acta Carsologica, 32, 148–159.
- MASTRONUZZI G., ARINGOLI D., AUCELLI P.P.C., BALDASSARRE M.A., BELLOTTI P., BINI M., BIOLCHI S., BONTEMPI S., BRANDOLINI P., CHELLI A., DAVOLI L., DEIANA G., DE MURO S., DEVOTO S., DI PAOLA G., DONADIO C., FAGO P., FERRARI M., FURLANI S., IBBA A., LUPA PALMIERI E., MARSICO A., MELIS R.T., MILELLA M., MUCERINO L., NESCI O., ORRÙ P.E., PANIZZA V., PENNETTA M., PIACENTINI D., PISCITELLI A., PUSCEDU N., RAFFI R., ROSSKOPF C.M., SANSÒ P., STANISLAO C., TARRAGONI C. & VALENTE A. (2017), *Geomorphological map of the Italian coast: from a descriptive to a morphodynamic approach*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 40, 161–195.
- MORAWIECKA I. & WALSH P. (1997), *A study of solution pipes preserved in the Miocene limestones (Staszów, Poland)*. Acta Carsologica, 26, 337–350.
- PAGLIARA C. (1987), *La Grotta Poesia di Roca (Melendugno-Lecce). Note preliminari*. Ann. Pisa, 17, 267–328.
- PAGLIARA C. (2001), *Roca*. In: NENCI G. & VALLET G. (a cura di), *Bibliografia topografica della colonizzazione greca in Italia e nelle isole Tirreniche*. XVI, Sc. Norm. Sup. – Ecole Française de Rome – Centre J. Berard Naples, p. 198–229.
- PARISE M. (2008), *Elementi di geomorfologia carsica della Puglia*. In: PARISE M., INGU-SCIO S. & MARANGELLA A. (Eds.), *Atti del 45° Corso CNSS-SSI di III livello “Geomorfologia Carsica”, Grottaglie, 2–3 febbraio 2008*, p. 93–118.
- PARISE M. (2015), *A huge cultural and historical heritage at risk: the underground settlements of southern Italy*. Proc. International Congress in Artificial Cavities “Hypogea 2015”, Rome, March 11–17, 2015, ISBN 978-88-89731-79-6, 53–60.
- PARISE M. (2019), *Sinkholes*. In: WHITE W.B., CULVER D.C. & PIPAN T. (Eds.), *Encyclopedia of Caves*. Academic Press, Elsevier, 3rd ed., ISBN 978-0-12-814124-3, p. 934–942.
- PARISE M. (2022), *Sinkholes, Subsidence and Related Mass Movements*. In: SHRODER J.J.F. (Ed.), *Treatise on Geomorphology*, vol. 5. Elsevier, Academic Press, ISBN 9780128182345, 200–220.
- PARISE M. & GUNN J. (Eds.) (2007), *Natural and anthropogenic hazards in karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation*. Geological Society London, Special Publication 279, 202 pp.
- PARISE M., FEDERICO A., DELLE ROSE M. & SAMMARCO M. (2003), *Karst terminology in Apulia (southern Italy)*. Acta Carsologica, 32 (2), 65–82.
- PARISE M., RAVBAR N., ŽIVANOVIC V., MIKSZEWSKI A., KRESIC N., MÁDL-SZÓNYI J. & KUKURIC N. (2015), *Hazards in Karst and Managing Water Resources Quality*. In: STEVANOVIC Z. (Ed.), *Karst Aquifers—Characterization and Engineering*. Professional Practice in Earth Sciences, Springer: Heidelberg, Germany, 601–687.
- PARISE M., GABROVSEK F., KAUFMANN G. & RAVBAR N. (2018), *Recent advances in karst research: from theory to fieldwork and applications*. In: PARISE M., GABROVSEK F., KAUFMANN G. & RAVBAR N. (Eds.), *Advances in Karst Research: Theory, Fieldwork and Applications*. Geological Society, London, Special Publications, 466, 1–24.
- RUDNICKI J. (1980), *Karst in coastal areas – development of karst processes in the zone of mixing of fresh and saline water (with special reference to Apulia, southern Italy)*. Studia Geologica Polonica, 65, 9–59.
- SANSÒ P., GIANFREDA F., LEUCCI G. & MASTRONUZZI G. (2016), *Cliff evolution and late Holocene relative sea level change along the Otranto coast (Salento peninsula, southern Apulia, Italy)*. GeoResearch, J9–12, 42–53.
- SCARANO T. (2010), *Roca. Le fortificazioni della media età del Bronzo*. Ann. Sc. Norm. Sup. Pisa, serie 5, 2 (2), 151–159.
- SCARANO T. (2019), *Una struttura funeraria ipogea dell'età del Bronzo presso Grotta Poesia a Roca Vecchia (Melendugno, LE): i dati della campagna di scavo 2008 nel quadro dei costumi funerari protostorici in Puglia*. Scavi di Antichità, 17, 35–61.
- VAN BEYNEN P.E. & TOWNSEND K. (2005), *A disturbance index for karst environments*. Environmental Management, 36, 101–116.
- VENNARI C. & PARISE M. (2022), *A chronological database about natural and anthropogenic sinkholes in Italy*. Geosciences, 12, 200.

Gli effetti ambientali del terremoto di Casamicciola (Isola d'Ischia) del 21 agosto 2017: un contributo alla definizione del modello sismogenetico per la valutazione del rischio sismico

The environmental effects of 21 August 2017 Casamicciola earthquake: a contribution to meaning of the seismogenic model for the assessment of seismic risk

Parole chiave: il terremoto di Casamicciola (Isola d'Ischia) del 2017; intensità macrosismica; scala ESI-07; faglie capaci; pericolosità sismica; sismicità vulcano-tettonica
Key words: 2017 Casamicciola earthquake (Ischia Island); macroseismic intensity; ESI 2007 scale; capable fault; seismic hazards, volcano-tectonic seismicity

Rosa Nappi¹, Sabina Porfido^{1,2}, Luigina Vezzoli³, Elisa Paganini³, Maria Francesca Ferrario³, Germana Gaudiosi¹, Giuliana Alessio¹, Alessandro Maria Michetti^{1,3}

¹ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli Osservatorio Vesuviano, Napoli

² CNR - I.S.A., Avellino

³ Università degli Studi dell'Insubria, Como

E-mail: rosa.nappi@ingv.it

INTRODUZIONE

Il 21 agosto 2017 alle 20:57 (ora locale) un terremoto con ipocentro molto superficiale ($h=1,2$ km), di magnitudo moderata ($M_d=4,0$), ha colpito l'isola vulcanica di Ischia (Lat. N40.74, Long. E13.90), provocando significativi effetti sull'ambiente naturale, ingenti danni a

Casamicciola Terme e Lacco Ameno, e la morte di due persone. La valutazione del livello di danneggiamento basato sulla scala Macrosismica Europea 98 (EMS-98), effettuato subito dopo il terremoto, ha evidenziato che l'area collinare di Casamicciola, ubicata sul versante settentrionale del Mt. Epomeo, è

stata la parte maggiormente danneggiata dell'Isola con danni localmente rilevanti ($I=VIII$ EMS, Azzaro *et al.* 2017).

Questo terremoto è stato il primo forte terremoto dell'era strumentale che ha provocato seri danni all'isola di Ischia, e ciò ha offerto l'opportunità di integrare e completare i dati già noti in letteratura relativamente alla sismicità storica, con le informazioni strumentali e la mappatura dettagliata degli effetti geologici cosismici (Nappi *et al.*, 2018; 2019; 2020).

Storicamente i terremoti che hanno provocato livelli di danneggiamento elevati si sono ripetuti con caratteristiche simili nella finestra temporale XVIII-XXI secolo (Alessio *et al.*, 1996; Cubellis e Luongo, 1998, 2018; De Natale *et al.*, 2019; Selva *et al.*, 2021). La loro localizzazione epicentrale è sistematicamente confinata nella stessa area di Casamicciola alta, nel raggio di pochi chilometri quadrati, dove si conserva una chiara traccia stratigrafica e morfologica dell'effetto cumulativo dei forti terremoti, rappresentata dal *graben* di Casamicciola, con andamento E-W ubicato alla base del versante Nord del Monte Epomeo. Tutti i terremoti degli ultimi secoli, in particolare quelli del 1796, 1828, 1881 e 1883, hanno l'epicentro nell'area del *graben*, formatosi a seguito della deformazione tettonica estensionale dell'Olocene (Fig. 1).

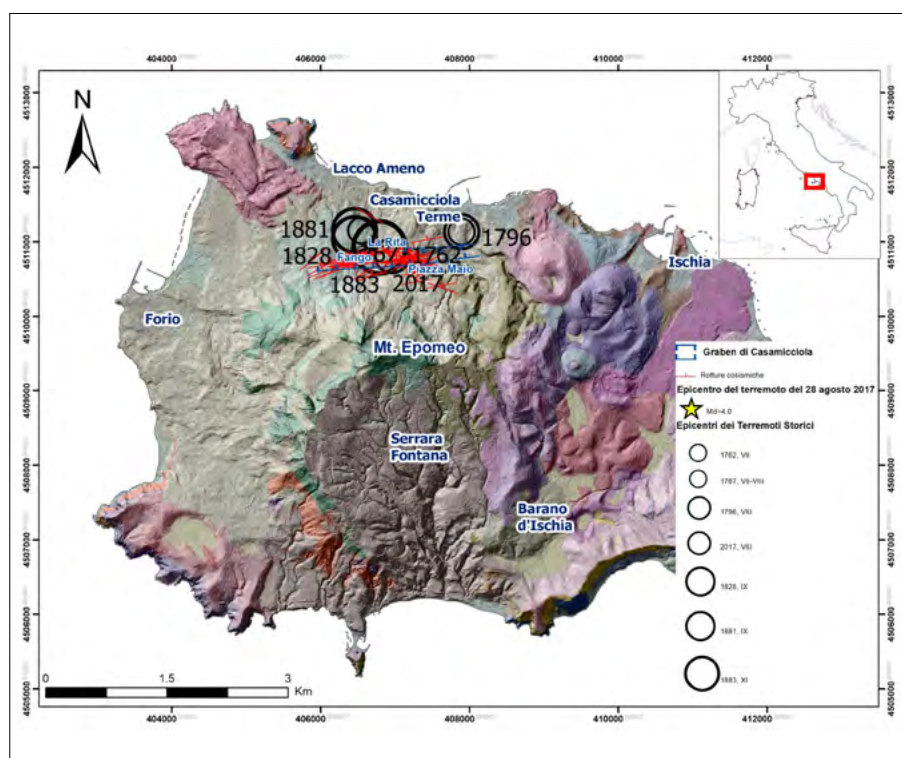


Figura 1. Nella figura sono mostrati: a) la sismicità storica, b) l'epicentro del terremoto di Casamicciola del 21 agosto del 2017, c) le rotture cosismiche, d) il graben di Casamicciola, sovrapposti alla carta geologica di Vezzoli *et al.*, (1988)

Per vincolare la sorgente sismogenetica responsabile del terremoto del 21 agosto del 2017, e presumibilmente degli analoghi o più severi eventi sismici storici, abbiamo effettuato il censimento degli effetti indotti dal terremoto sull'ambiente naturale, sia primari che secondari (Fig. 2), utilizzando per la valutazione dell'intensità la nuova scala macrosismica "Environmental Seismic Intensity" (ESI-07scale; Michetti *et al.*, 2007). Abbiamo raccolto dati relativi a circa 100 siti con effetti ambientali cosismici, che insieme alle informazioni geofisiche disponibili, hanno consentito di contribuire alla definizione del modello di sorgente.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO E VULCANOLOGICO

Ischia è un'isola vulcanica attiva situata a NO del Golfo di Napoli e rappresenta la porzione subaerea di un complesso sistema vulcanico attivo da almeno 150.000 anni (Vezzoli, 1988). Il perimetro dell'Isola è caratterizzato da un orlo calderico; al suo centro emerge il rilievo morfologico del Monte Epomeo (787 m s.l.m.), considerato un *horst* vulcano-tettonico (Rittman, 1930; Gillot, 1985) (Fig. 1).

L'attività vulcanica è stata caratterizzata da numerose eruzioni effusive ed esplosive alternate a periodi di quiescenza (Vezzoli 1988; Tibaldi e Vezzoli, 2004; de Vita *et al.*, 2010). L'eruzione del Tufo Verde (55.000 anni fa) è stato l'evento geologico storico dominante dell'isola seguito dal collasso del settore centrale con conseguente formazione della caldera.

All'interno della caldera, la risorgenza del blocco del Monte Epomeo è iniziata circa 30.000 anni fa (Gillot *et al.* 1982; Civetta *et al.* 1991; Orsi *et al.* 1991; de Vita *et al.* 2006). I fenomeni di risorgenza, controllati da sistemi di faglie normali E-O (Fig. 1), sono stati attribuiti a ripetute iniezioni di nuovo magma in una camera magmatica superficiale a profondità di 2-3 km (Vezzoli 1988; Orsi *et al.* 1991; Tibaldi e Vezzoli 1998; Vezzoli *et al.*, 2009; Acocella e Funicello 1999; de Vita *et al.*, 2010) e sono responsabili della morfologia asimmetrica del rilievo topografico di Ischia.

Le eruzioni dell'ultimo periodo di attività vulcanica iniziarono 10.000 anni fa e si concentrarono nel settore orientale dell'isola, terminando con l'ultima eruzione effusiva dell'Arso nel 1302 (de Vita *et al.* 2010).

L'intensa attività idrotermale (Chiodini *et al.*, 2004), la deformazione del

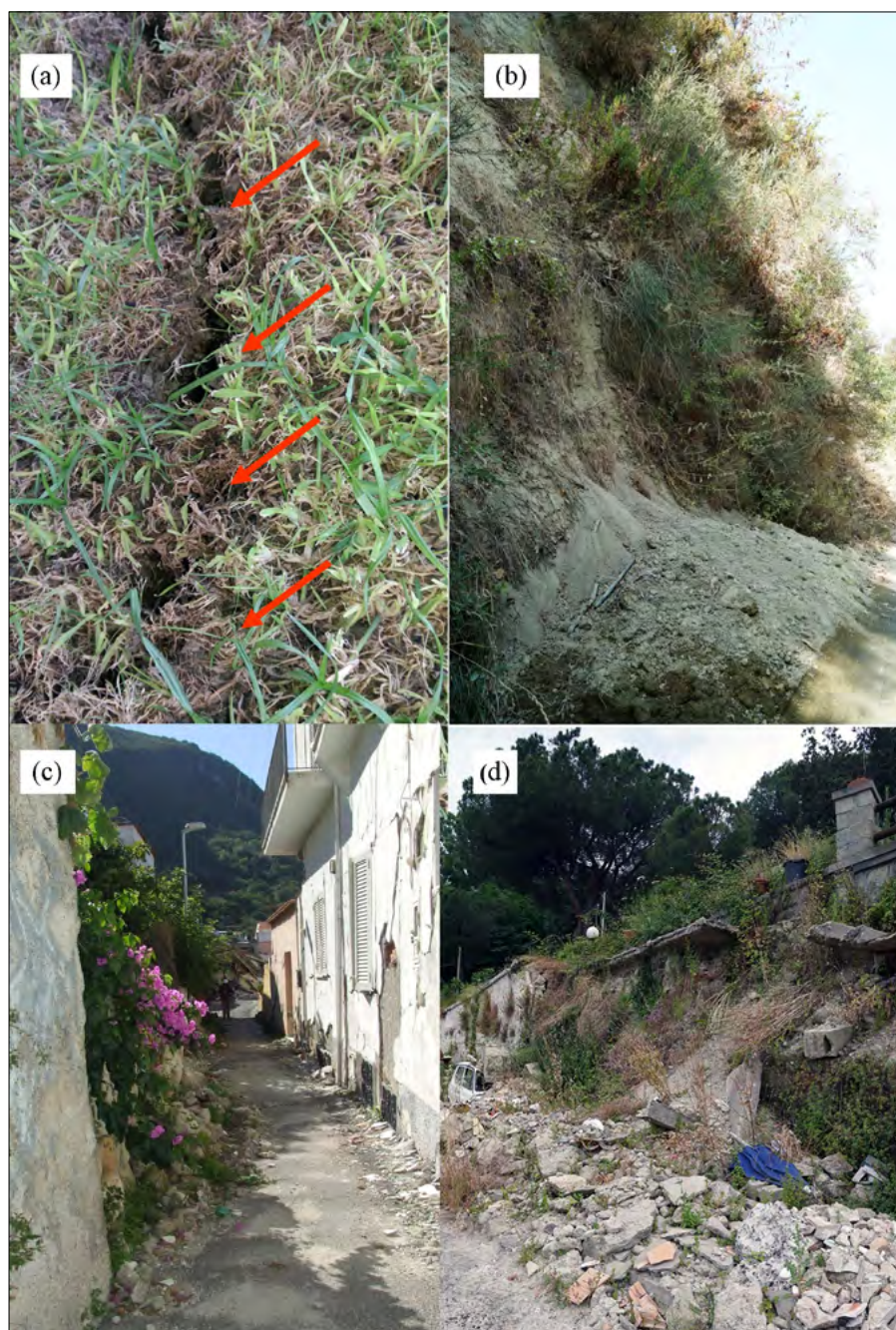


Figura 2. Nella figura sono mostrati gli effetti cosismici primari a) rottura nel terreno e secondari b) frana nei depositi vulcanici c) crollo muretti a secco (parracine) con in fondo, ben visibile il crollo di una casa; d) crollo di un rilevato stradale con in alto a destra ben visibile la rotazione del pilastro

suolo (Ricco *et al.*, 2018; Sepe *et al.*, 2007), l'instabilità dei versanti e l'attività sismica hanno caratterizzato il persistente stato di attività dell'isola. L'attività idrotermale con fumarole, sorgenti termali e aree di degassazione diffuse, è concentrata lungo le faglie che delimitano i versanti settentrionale e occidentale del Monte Epomeo. Come evidenziato anche dall'ultimo evento alluvionale del 2022, (<https://www.protezionecivile.gov.it/it/notizia/emergenza-maltempo-ischia-operativo-tutto-il-sistema-di-protezione-civile-0>) l'instabilità dei versanti è oggi concentrata principalmente nel settore settentrionale. Tuttavia, importanti deformazioni gravitative sono evidenti anche nel settore occidentale dell'Isola e lungo il versante meri-

dionale del Monte Epomeo (Del Prete e Mele 2006; Mele e Del Prete 1998; Tibaldi e Vezzoli 2004, Della Seta *et al.*, 2012).

SISMICITÀ DELL'ISOLA D'ISCHIA

Le prime informazioni attendibili sulla sismicità di Ischia risalgono al terremoto del XIII secolo e le informazioni più complete sulla sismicità risalgono alla fine del secolo XVIII quando iniziò una consistente attività sismica che si sviluppò ulteriormente nel secolo successivo (Selva *et al.*, 2021). Gli eventi sismici sono tutti caratterizzati dalla ricorrenza degli epicentri a nord del Monte Epomeo, in particolare nella parte collinare del comune di Casamic-

ciola Terme, caratterizzati da una forte intensità epicentrale ($I > VII$ MCS) che diminuisce rapidamente con l'aumentare della distanza dall'epicentro. I terremoti più forti sono avvenuti il 4 marzo 1881 ($I_0 = IX$ MCS; $M_e = 4.3$), (Alessio *et al.*, 1996) e il 28 luglio 1883 ($I_0 = XI$ MCS; $M_e = 5.2$) (Cubellis e Lungo, 1998). Entrambi i terremoti distrussero il paese di Casamicciola e dintorni, provocando 120 morti e ferendo 140 persone nel 1881 e 2343 morti nel 1883. I campi macrosismici dei terremoti del 1881 e del 1883 mostrano le isosisme allungate in direzione E-O lungo il settore N dell'isola tra Lacco Ameno e Piazza Bagni a Casamicciola Terme (Cubellis *et al.*, 2004). Il terremoto del 1883 fino ad oggi è noto come l'evento sismico con la più elevata intensità macrosismica e si è verificato solo due anni dopo il catastrofico evento del 1881 ($I_0 = IX$ MCS). Il valore di intensità pari a XI MCS estremamente severo osservato nell'area epicentrale per il terremoto del 1883 può essere attribuito a diversi fattori tra cui (i) l'elevata distruttività dovuta alla faglia superficiale; (ii) i problemi di amplificazione del sito dovuti alle complesse variazioni litologiche nell'area epicentrale; (iii) la scarsa qualità dell'edificato dell'epoca. Nel XX secolo, prima del terremoto del 2017, sono stati registrati solo eventi di bassa energia con epicentro nel settore settentrionale dell'isola. Dal 1999 sono stati registrati dalla rete sismica permanente di Ischia dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Vesuviano (D'Auria *et al.*, 2018; Sernade database, ultimo accesso gennaio 2021) 50 eventi con M_l 2.3 o inferiore e profondità inferiori a 2 km. La sismicità complessiva dell'isola d'Ischia ha un chiaro carattere vulcano-tettonico con ipocentri poco profondi (meno di 2 km), localizzati per lo più alla base Nord del Monte Epomeo (Fig. 1).

L'intensità MCS massima osservata varia tra VII e XI (Nappi *et al.*, 2018) e decresce rapidamente di valore con la distanza dagli epicentri.

CAMPO MACROSISMICO ESI 2007

In generale, i terremoti inducono effetti su persone, edifici, infrastrutture artificiali, e ambiente naturale. Le tradizionali scale macrosismiche (MCS, Mercalli Cancani Sieberg (Sieberg, 1930), MM, Mercalli modificato MSK (Wood e Neumann, 1931), Medvedev-Sponheuer-Karnik (Medvedev, 1977); EMS, Scala Macrosismica Europea,

(Grunthal, G., 1998) valutano il valore dell'intensità sulla base dei danni agli edifici e infrastrutture; questo può essere difficile per gradi di intensità superiori a X o quando i campi macrosismici di più eventi sismici ravvicinati nel tempo si sovrappongono. Le tradizionali scale macrosismiche presentano alcuni inconvenienti, come la forte dipendenza dalla distribuzione nello spazio degli edifici, la loro tipologia e caratteristiche, e la saturazione nel caso di gradi di intensità elevati ($I > IX$ MCS). Un approccio complementare consiste nell'assegnare l'intensità attraverso la scala ESI 2007. Questa è una nuova scala di intensità basata sugli effetti ambientali (Michetti *et al.*, 2007; Serva, 2019). È una scala che comprende XII gradi e gli effetti del terremoto sull'ambiente naturale che vengono utilizzati per la valutazione dell'intensità sono divisi in effetti primari e secondari. Gli effetti primari sono direttamente collegati alla sorgente del terremoto, come la fagliazione superficiale, il sollevamento tettonico o la subsidenza. Gli effetti secondari sono correlati allo scuotimento sismico, come fratture del terreno, liquefazione, movimenti franosi, tsunami, variazioni idrogeologiche, formazione di nubi di polvere ed effetti sulle piante.

La distribuzione e la grandezza degli effetti primari compresi tra $I = X$ e $I = XII$ costituiscono l'indicatore più affidabile per la valutazione dell'intensità; sotto $I = X$, gli effetti rilevati sono analizzati insieme agli indicatori di danno delle altre scale (in Italia, MCS, MSK e EMS). L'obiettivo della scala ESI è quello di rappresentare al meglio il campo macrosismico di un terremoto in base agli effetti ambientali, che sono confrontabili in una finestra temporale più grande di quello dei dati strumentali. Inoltre, gli effetti sull'ambiente naturale non dipendono dalle condizioni socio-economiche dell'area indagata.

Anche se il terremoto di Casamicciola del 2017 è stato un evento sismico vulcano-tettonico di energia moderata, abbiamo osservato diversi effetti al suolo sia primari (rottture superficiali e spostamenti permanenti causati direttamente dalla sorgente sismogenetica), che secondari (frane, variazioni idrologiche). Gli effetti al suolo più rilevanti, mappati durante il rilievo sul campo sono stati: rottture del terreno, fratture, frane, variazioni nell'attività fumarolica e crollo dei muretti a secco (Nappi *et al.*, 2018; Emergeo WG, 2019; Nappi *et al.*, 2020). In generale tutta la zona indagata presentava fratture (piccole

fratture aperte con spostamento verticale ≤ 1 cm), sia su manufatti che sul terreno, su strada e sul suolo di copertura, per lo più con andamento da ONO a E-O, e lunghezze fino a qualche decina di metri (Fig. 1). Inoltre, sono state osservate alcune rottture cosismiche nel suolo e strutture artificiali con apertura massima di 3 cm e in alcuni casi con un ribassamento verticale di circa 2 cm con apprezzabile spostamento verso NNO. Sono stati osservati anche diffusi fenomeni di crollo dei muri a secco, conosciuti come "parracine", costruiti prevalentemente con tufo verde e anche con materiali lavici, con una generale direzione di movimento di caduta da Sud a Nord e modesti fenomeni gravitativi di versante e piccole frane nei depositi vulcano clastici lungo il versante Nord del Monte Epomeo (Nappi *et al.*, 2018; Nappi *et al.*, 2021). Tutti gli effetti osservati sono concentrati in una fascia di direzione E-O lunga 2 km con uno spessore inferiore al km. Inoltre, è stato riportato dagli abitanti che la fumarola di Montecito ha aumentato l'emissione fumarolica subito dopo il terremoto.

Secondo Nappi *et al.* (2018) la distribuzione degli effetti cosismici definisce la lunghezza della rottura, *end to end*, di 2 km, con immersione verso Nord, come rottura primaria in superficie del terremoto vulcano-tettonico del 21 agosto 2017.

Per la costruzione del campo macrosismico ESI 2007 sono stati assegnati i dati di intensità considerando il luogo in cui era stato osservato l'effetto ambientale, raccogliendo 114 punti (Fig. 3) e elaborato 48 schede descrittive dettagliate (Nappi *et al.*, 2021). Gli effetti ambientali cosismici sono rappresentati complessivamente, per gli effetti primari, dal 60% di rottture e 16% di fratture e per gli effetti secondari dal 12% di crolli dei muri a secco, 9% di fenomeni franosi, 3% di variazioni di vapore nelle fumarole di Montecito (Nappi *et al.*, 2018). Considerata la distribuzione dei dati cosismici, primari e secondari, e i crolli dei muretti a secco (dati riportati perché ubicati nelle immediate vicinanze degli effetti al suolo) abbiamo valutato l'intensità ESI epicentrale. Abbiamo assegnato il VII grado della scala ESI tenendo conto della lunghezza totale del segmento di faglia, circa 2 km, e lo spostamento massimo osservato, circa 2-3 cm, così come l'area interessata da altri effetti cosismici secondari, che è solo di pochi km^2 . Il grado massimo di intensità rilevata $I = VII$ ESI è in corrispondenza delle località di Piazza Maio, La Rita, e

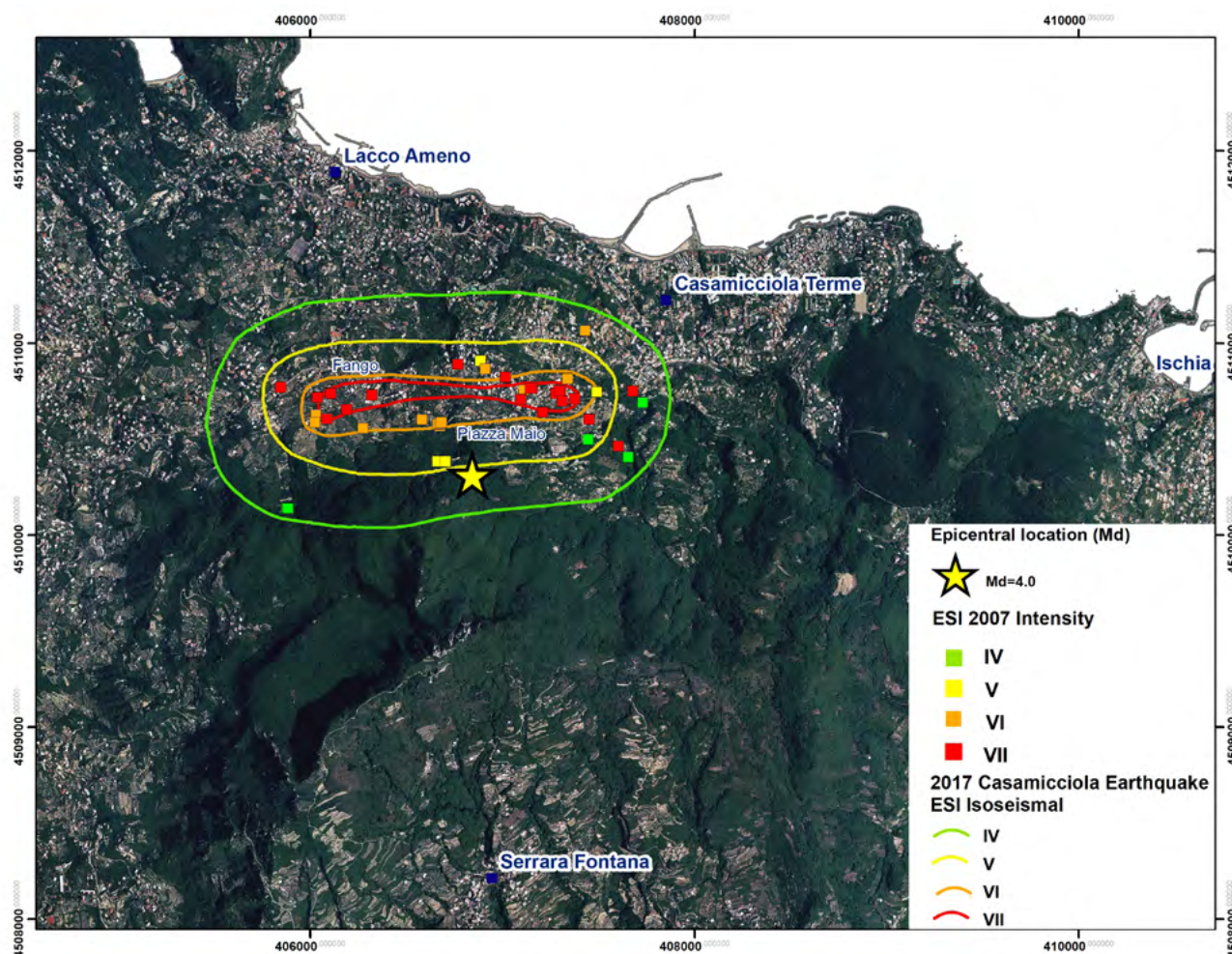


Figura 3. Isosisme del terremoto di Casamicciola del 21 agosto 2017 elaborate utilizzando la scala ESI 2007 modificata da Nappi *et al.*, (2021)

Fango (Lacco Ameno) (Fig. 1). In base ai gradi di intensità assegnati ai singoli siti è stato possibile tracciare le isosisme (Fig. 3). L'isosisma che racchiude il VII grado ha una forma allungata e comprende una superficie di circa 1000x100 m. Considerato che l'ipocentro è molto superficiale, sosteniamo che questa isosisma racchiuda la faglia normale responsabile del terremoto del 21 agosto 2017. Questo risultato è in accordo con la faglia in superficie mappata e con il modello geofisico delle faglie a nord del Monte Epomeo (Nappi *et al.*, 2018; Nappi *et al.*, 2019; Calderoli *et al.*, 2019). Le successive isosisme sono concentriche e arrivano a comprendere un'area di 2 km², senza raggiungere la zona costiera di Casamicciola Terme, il centro di Lacco Ameno, e gli altri piccoli comuni dell'isola. Il campo macrosismico ha un'estensione limitata, in cui si osserva la rapida attenuazione dell'intensità in pochi chilometri.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Dall'analisi del campo macrosismico è emerso che la concentrazione degli effetti cosismici ambientali e i danni gravi sono concentrati in un'area ristretta a

nord del Monte Epomeo. Le assegnazioni di intensità con le scale tradizionali mostrano che gli effetti meno gravi sono sulle strutture antropiche, e limitatamente al resto dell'isola. La distribuzione spaziale degli effetti ambientali del terremoto e la mappa delle isosisme ESI confermano che l'area tra Fango (Lacco Ameno) e Piazza Bagni è l'area epicentrale. Risulta evidente che i gravi danni osservati nelle località di Casamicciola alta e Lacco Ameno (I-VIII EMS) sono strettamente correlati alla traccia della faglia superficiale osservata, chiaramente influenzati dalla geometria della sorgente sismogenetica. La mappa delle isosisme ESI suggerisce anche che la localizzazione della sorgente sismogenetica è in accordo con quella ipotizzata da Nappi *et al.*, (2018) con una direzione E-W e immersione verso N associata al sistema di faglie estensionali oloceniche responsabili del sollevamento del fianco N del Monte Epomeo.

Questa interpretazione è consistente anche con l'ipotesi di sorgente fatta utilizzando i dati InSAR (Albano *et al.*, 2018) che evidenziano una buona correlazione tra le deformazioni del suolo misurate e calcolate per cui l'ampiezza della deformazione modellata è simile

a quella cosismica osservata. Inoltre, è importante evidenziare come l'approccio metodologico applicato è da ritenersi corretto anche per la valutazione della pericolosità sismica nell'isola d'Ischia che vale la pena ricordare a causa dell'elevata densità di popolazione, soprattutto nei mesi estivi per il turismo termale è esposta ad elevato rischio sismico. In conclusione è possibile affermare che dalla distribuzione spaziale del danno strutturale riteniamo che le aree che racchiudono il sistema di faglie attive e capaci non siano da ritenersi idonee alla ricostruzione degli edifici. Inoltre, la presenza della sorgente sismogenetica molto superficiale, potenzialmente riattivabile anche per i futuri terremoti, influenza notevolmente le caratteristiche fisiche e meccaniche dei depositi affioranti. L'applicazione della scala ESI 2007 al terremoto di Casamicciola Terme del 21 agosto 2017 e l'assegnazione dell'intensità sismica permette una migliore risoluzione spaziale, nonché un aumento della finestra temporale per la valutazione della pericolosità sismica, consentendo di ridurre l'incertezza implicita nelle leggi di attenuazione dell'intensità in questo peculiare contesto vulcano-tettonico.

BIBLIOGRAFIA

- ALBANO M., SAROLI M., MONTUORI A., BIGNAMI C., TOLOMEI C., POLCARI M., PEZZO G., MORO M., ATZORI S., STRAMONDO S., SALVI, S. (2018), *The relationship between InSAR coseismic deformation and earthquake-induced landslides associated with the 2017 Mw 3.9 Ischia (Italy), earthquake*, *Geoscience* 8, 303. <https://doi.org/10.3390/geosciences8080303>
- ACOCCELLA V., FUNICIELLO R. (1999), *The interaction between regional and local tectonics during resurgent doming: The case of the island of Ischia, Italy*, *J. Volcanol. Geoth. Res.* 88, 109–123.
- ALESSIO G., ESPOSITO E., FERRANTI L., MASTROLORENZO G., PORFIDO S. (1996), *Correlazione tra sismicità ed elementi strutturali nell'isola di Ischia*, *Quaternario* 1996, n.9, 303–308.
- AZZARO R., DEL MESE S., MARTINI G.; PAOLINI S., SCREPANTI A., VERROBBI V., TERTULLIANI A. (2017), *QUEST-Rilievo Macrosismico Dell'isola di Ischia del 21 agosto 2017*, Rapporto Interno INGV: Roma, Italy.
- CALDERONI G., DI GIOVAMBATTISTA R., PEZZO G., ALBANO M., ATZORI S., TOLOMEI C., VENTURA G. (2019), *Seismic and geodetic evidences of a hydrothermal source in the Md 4.0, 2017, Ischia earthquake (Italy)*, *J. Geophys. Res. Solid Earth* 124, 5014–5029.
- CHIODINI G., AVINO R., BROMBACH T., CALIRO S., CARDELLINI C., DE VITA S., FRONZINI F., GRANIERI D., MAROTTA E., VENTURA G. (2004), *Fumarolic and diffuse soil degassing west of Mount Epomeo, Ischia, Italy*, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 133:291–309.
- CIVETTA L., GALLO G., ORSI G. (1991), *Sr- and Nd- isotope and trace-element constraints on the chemical evolution of the magmatic system of Ischia (Italy) in the last 55 ka*, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 46, 213–230.
- CUBELLIS E., LUONGO G. (1998), *Il Terremoto del 28 luglio 1883 a Casamicciola nell'isola di Ischia*, *Il Contesto Fisico*, in AA.VV., Presidenza Consiglio dei Ministri, Servizio Sismico Nazionale, Poligrafico e Zecca dello Stato: Roma, Italy, pp. 49–123.
- CUBELLIS E., LUONGO G. (2018), *History of Ischia Earthquakes*, Bibliopolis: Naples, Italy.
- DE NATALE G., PETRAZZUOLI S., ROMANELLI F., TROISE C., VACCARI F., SOMMA R., PERESAN A., PANZA G.F. (2019), *Seismic risk mitigation at Ischia island (Naples, Southern Italy): An innovative approach to mitigate catastrophic scenarios*, *Engineering, Geology*, Volume 261, 2019, 105285, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105285>.
- D'AURIA L., GIUDICEPIETRO F., TRAMELLI A., RICCIOLINO P., LO BASCIO D., ORAZI M., MARTINI M., PELUSO R., SCARPATO G., ESPOSITO A. (2018), *The seismicity of Ischia Island*, *Seism. Res. Lett.*, 89, 1750–1760.
- DE VITA S., SANSIVERO F., ORSI G., MAROTTA E. (2006), *Cyclical slope instability and volcanism related to volcano-tectonism in resurgent calderas: The Ischia island (Italy) case study*, *Eng. Geol.* 86, 148–165.
- DE VITA S., SANSIVERO F., ORSI G.; MAROTTA E., PIOCHI M. (2010), *Volcanological and structural evolution of the Ischia resurgent caldera (Ischia) over the past 10 ka*, *Geol. Soc. Am.* 464, 193–239.
- DELLA SETA M., MAROTTA E., ORSI G., DE VITA S., SANSIVERO F., E FREDI P. (2012), *Slope instability induced by volcano-tectonics as an additional source of hazard in active volcanic areas: the case of Ischia island (Italy)*, *Bull. Volcanol.* 74, 79–106, doi: 10.1007/s00445011-0501-0.
- DEL PRETE S., MELE R. (2006), *Il contributo delle informazioni storiche per la valutazione della propensione al dissesto nell'Isola d'Ischia (Campania)*, *Rend. Soc. Geol. Ital.* 2, 29–47.
- EMERGEU WORKING GROUP, NAPPI R., ALESSIO G., GAUDIOSI G., NAVE R., MAROTTA E., SINISCALCHI V., CIVICO R., PIZZIMENTI L., PELUSO R., BELVISO P., PORFIDO S. (2019), *A photographic collection of the coseismic geological effects induced by the 21 August 2017, M=4, Casamicciola earthquake (Ischia island, Italy)*, *MISC.* 50, 194.
- GILLOT P.Y. (1985), *The Recent Volcanic Activity in the Gulf of Naples: Compared Evolution of Ischia and Phlegraean Fields*. In *Proceedings of the IAVCEI Scientific Assembly*, Giardini di Naxos, Italy, 16–21 September 1985; pp. 25–35.
- GRUNTHAL G. (Ed.), *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15; Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie: Luxembourg, 1998; p. 99.
- GRUPPO DI LAVORO INGV SUL TERREMOTO DELL'ISOLA DI ISCHIA (2017), *Rapporto di Sintesi Preliminare sul Terremoto Dell'isola D'ISCHIA (Casamicciola) M4.0 del 21 agosto 2017* (6 Settembre 2017); INGV: Napoli, Italia, 2017.
- MEDVEDEV S.V. (1977), *Seismic intensity scale MSK-76*, *Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.*, 117, 95.
- MELE R. E DEL PRETE S. (1998), *Fenomeni di instabilità dei versanti in Tufo Verde del Monte Epomeo (Isola d'Ischia-Campania)*, *Boll. Soc. Geol. Ital.* 117, 93–112.
- MICHETTI A.M., ESPOSITO E., GUERRIERI L., PORFIDO S., SERVA L., TATEVOSSIAN R., VITTORI E., AUDEMART F., AZUMA T., CLAGUE J., et al. (2007), *Environmental Seismic Intensity Scale 2007- ESI 2007*, in *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, Servizio Geologico d'Italia-Dipartimento Difesa del Suolo, APAT: Roma, Italia Volume 74, pp. 7–54.
- NAPPI R., ALESSIO G., GAUDIOSI G., NAVE R., MAROTTA E., SINISCALCHI V., CIVICO R., PIZZIMENTI L., PELUSO R., BELVISO P., PORFIDO S. (2018), *The 21 August 2017 Md 4.0 Casamicciola Earthquake: First Evidence of Coseismic Normal Surface Faulting at the Ischia Volcanic Island*, *Seismol. Res. Lett.*, 89, 1323–1334.
- NAPPI R., ALESSIO G., GAUDIOSI G., NAVE R., MAROTTA E., SINISCALCHI V., CIVICO R., PIZZIMENTI L., PELUSO R., BELVISO P., et al. (2019), *Reply to "Comment on 'The 21 August 2017 Md 4.0 Casamicciola Earthquake: First Evidence of Coseismic Normal Surface Faulting at the Ischia Volcanic Island'"*, by V. De Novellis, S.; Carlino, R.; Castaldo, A.; Tramelli, C. De Luca, NA Pino, S.; Pepe, V.; Convertito, I.; Zinno, P. De Martino, M.; Bonano, F.; Giudicepietro, F.; Casu, G.; Macedonio, M.; Manunta, M.; Manzo, G.; Solaro, P.; Tizzani, G. Zeni, and R. Lanari. *Seism. Res. Letters*, 90, 316–321.
- NAPPI R., NAVE R., GAUDIOSI G., ALESSIO G., SINISCALCHI V., MAROTTA E., CIVICO R., PIZZIMENTI L., PELUSO R., BELVISO P., PORFIDO S. (2020), *Coseismic evidence of surface faulting at the Ischia Volcanic Island after the 21 August 2017 Md 4.0 Casamicciola Earthquake*, *Pangaea* 2020.
- NAPPI R., PORFIDO S., PAGANINI E., VEZZOLI L., FERRARIO M.F., GAUDIOSI G., ALESSIO G., MICHETTI A.M. (2021), *The 2017, MD = 4.0, Casamicciola Earthquake: ESI-07 Scale Evaluation and Implications for the Source Model*, *Geosciences*, 11, 44. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020044>.
- ORSI G., GALLO G., ZANCHI A. (1991), *Simple-shearing block resurgence in caldera depressions. A model from Pantelleria and Ischia*, *J. Volcan. Geotherm. Res.* 47, 1–11.
- Rittman A. (1930) *Geologie der Insel Ischia*, *Erganzung Band: Berlin, Germany*, 1930; Volume 6, p. 268.
- SELVA J., AZZARO R., TARONI M., TRAMELLI A., ALESSIO G., CASTELLANO M., CIUCARELLI C., CUBELLIS E., LO BASCIO D., PORFIDO S., RICCIOLINO P., ROVIDA A. (2021), *The Seismicity of Ischia Island, Italy: An Integrated Earthquake Catalogue From 8th Century BC to 2019 and Its Statistical Properties*, *Front. Earth Sci.* 9:629736. doi: 10.3389/feart.2021.629736.
- RICCO C., ALESSIO G., AQUINO I., BRANDI G., BRUNONI C.A., D'ERRICO V., DOLCE M., MELE G., NAPPI R., PIZZIMENTI L., SEPE V., SINISCALCHI V., DEL GAUDIO C. (2018), *High precision leveling survey following the Md 4.0 Casamicciola earthquake of August 21, 2017 (Ischia, Southern Italy): field data and preliminary interpretation*, *Annals of Geophysics*, 61, 6, GD665, 2018; doi: 10.4401/ag-7769.
- SEPE V., ATZORI S., VENTURA G. (2007), *Subsidence due to crack closure and depressurization of hydrothermal systems: a case study from Mt. Epomeo (Ischia Island, Italy)*, *Terra Nova* 19 (2):127–132.
- SERENADE DATABASE, SEISMIC RESTFUL ENABLED DATABASE. Available online: <http://wessel.ov.ingv.it/serenade/>
- SERVA L. (2019), *History of the Environmental Seismic Intensity Scale ESI-07*, *Geosciences*, 9, 210.
- SIEBERG A. (1930), *Geologie der Erdbeben*, *Handb. Geophys.*, 2, 552–555.
- TIBALDI A. VEZZOLI L. (2004), *A new type of volcano flank failure: The resurgent caldera sector collapse, Ischia, Italy*, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L14605.
- VEZZOLI L. (1988), *Island of Ischia*. In: *Quaderni de la Ricerca Scientifica*; Vezzoli, L., Ed.; Consiglio Nazionale delle Ricerche: Roma, Italy, 1988; pp. 1–122.
- WOOD H.O., NEUMANN F. (1931), *Modified Mercalli intensity scale of 1931*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 21, 277–283.

I fenomeni di Sinkhole, stato delle conoscenze in Italia e problematiche aperte

Stefania Nisio

ISPRA - Dipartimento per il Servizio Geologico d'Italia

E-mail: stefania.nisio@isprambiente.it

Sinkhole phenomena, state of knowledge in Italy and open issues

Parole chiave: sinkhole, cavità sotterranee, piping, classificazione dei sinkhole

Key words: sinkhole, underworld cavities, piping, sinkhole classification

INTRODUZIONE

Negli ultimi quarant'anni è stato registrato un aumento dei fenomeni di sprofondamento del terreno (sinkholes), con dimensioni ragguardevoli in diametro e profondità (Fig. 1).

I sinkholes si verificano in aree extraurbane, per lo più di pianura, per cause naturali connesse al contesto geologico (sinkhole naturali), ovvero in città, nelle aree più densamente urbanizzate (sinkhole antropogenici).

I fenomeni naturali danno origine a voragini generalmente di forma sub-circolare, con diametro variabile da alcuni metri fino a centinaia di metri.

A volte, infatti, le dimensioni sono tali da originare veri e propri *laghi di sprofondamento*, attraverso il processo di annegamento; i sinkholes tendono ed evolvere la loro forma nel tempo arrivando anche all'estinzione (Nisio, 2003, 2008 a; Caramanna *et al.* 2008; Madonna & Nisio 2020, 2021).

I sinkholes avvenuti negli ultimi anni sono stati censiti e studiati e hanno portato ad una migliore interpretazione dei meccanismi genetici; quelli formati in epoca storica o remota sono stati individuati attraverso ricerche topografiche e cartografiche, analizzando cronache e documenti d'epoca (Albanesi *et al.*; Nisio 2014 a, b). Anche gli ultimi episodi di sinkhole in Italia mostrano come il contesto geologico delle aree suscettibili sia estremamente differente.

Tra gli eventi di sprofondamento occorsi tra gli anni 2021-2023 si ricorda il caso registrato l'8 marzo 2021 a Montieri in Toscana (Grosseto).

Tale sinkhole si è aperto in una conca intramontana colmata di alluvioni (Fig. 2) per grandi spessori che poggiano su di un basamento rappresentato dal calcare cavernoso; tale territorio della Toscana è stato interessato in passato da altri eventi simili: in linea con esso è ubicato, infatti, il piccolo lago di Monterotondo Marittimo esso, inoltre, è prossimo al noto Lago dell'Accesa di Massa Marittima



Figura 1. Il Sinkhole di Raveo (Friuli Venezia Giulia), aprile 2022



Figura 2. Sinkhole di Montieri in Toscana, 8 marzo 2021



Figura 3. Sinkhole di Latera (Viterbo) 1 febbraio 2023



Figura 4. Sinkhole di Patrica (Frosinone), 12 gennaio 2023

originatosi per sprofondamento in epoca medievale (Nisio 2008 f).

I primo febbraio 2023 si è originata a Latera (provincia di Viterbo) una voragine di 36 m di diametro (Fig. 3). Il contesto geologico di tale fenomeno è totalmente differente: il territorio vulcanico di Latera è ricco di emanazioni di gas e il sottosuolo è caratterizzato da alternanze di lave e piroclastiti.

Ancora diverso sembra il caso di Patrica in provincia di Frosinone (Fig. 4), avvenuto il 12 gennaio 2023, in cui si sono originate sei voragini in linea (di cui l'ultima ha interessato la sede stradale) con diametri compresi tra i 5 e 15 metri.

Il censimento ad oggi più completo dei fenomeni di sprofondamento è stato

compiuto da ISPRA, che ha realizzato sin dal 2004 il *Database Nazionale dei Sinkhole* in cui sono raccolti alcune migliaia di eventi di sprofondamento.

I dati raccolti, anche con la collaborazione delle Regioni e delle Arpa, sono stati condivisi con gli Enti locali e sono attualmente scaricabili dal sito ISPRA.

Permangono attualmente alcuni aspetti da approfondire riguardo questi fenomeni.

Ancora oggi l'utilizzo del termine *sinkhole*, introdotto inizialmente come sinonimo di dolina per la prima volta da Fairbridge (1968), ed in seguito utilizzato da Monroe (1970), per indicare le depressioni sub-circolari in area carsica, ha generato confusione riguardo

i meccanismi genetici del processo di sprofondamento.

La genesi di un sinkhole, infatti, può essere molto differente da un processo carsico; pertanto, risulta necessario individuare i processi genetici e specificare la tipologia del sinkhole attraverso una adeguata classificazione.

CLASSIFICAZIONE DEI SINKHOLE

Tra le problematiche ancora aperte vi è la difficoltà di realizzare una classificazione soddisfacente dei sinkholes in base alla casistica italiana.

Tale difficoltà risiede nel fatto che lo sviluppo di tali fenomeni è spesso legato alla coesistenza di più variabili, la cui trattazione non risulta sempre di facile analisi.

Molteplici sono infatti i fattori che partecipano all'evoluzione di uno sprofondamento catastrofico, generando nel territorio italiano fenomeni con caratteristiche estremamente variabili, tali fenomeni peculiari non sono rappresentati nelle classificazioni straniere.

Nelle piane interne italiane spesso i sinkholes si generano su terreni piroclastici sovrapposti a rocce vulcaniche, in altri casi il bedrock carbonatico è spesso a grandi profondità, sottoposto a coperture di argille e/o di terreni semi-permeabili.

Una classificazione proposta in ambito internazionale è quella di Waltham & Fookes (2003) Waltham *et al.* (2005) in cui i fenomeni di sinkholes vengono suddivisi in sei tipologie: *sinkhole da dissoluzione*, *sinkhole da crollo*, *sinkhole della copertura*, *sinkhole per caduta a goccia*, *sinkhole da suffosione*, *sinkhole sepolti*.

Ulteriori classificazioni tengono in considerazione per lo più i fenomeni carsici quale quella di (Guterriez *et al.* 2007, 2008).

La classificazione italiana proposta da ISPRA (Nisio, 2003; Nisio & Salvati, 2004; Nisio *et al.* 2007; Caramanna *et al.* 2008; Nisio, 2008), e in corso di revisione ed approfondimento (Fig. 5), divide i fenomeni in due grandi macro categorie: sprofondamenti antropogenici (coincidenti con il termine di *anthropogenic sinkhole*) e sprofondamenti naturali (*natural sinkhole* in contrapposizione a quelli di origine antropica).

Questi ultimi possono poi essere suddivisi in base al meccanismo genetico che li ha originati possono essere divisi in:

- i) fenomeni carsici;
- ii) fenomeni *suffosione* superficiale e di *piping* profondo;
- iii) fenomeni di *eversione*.

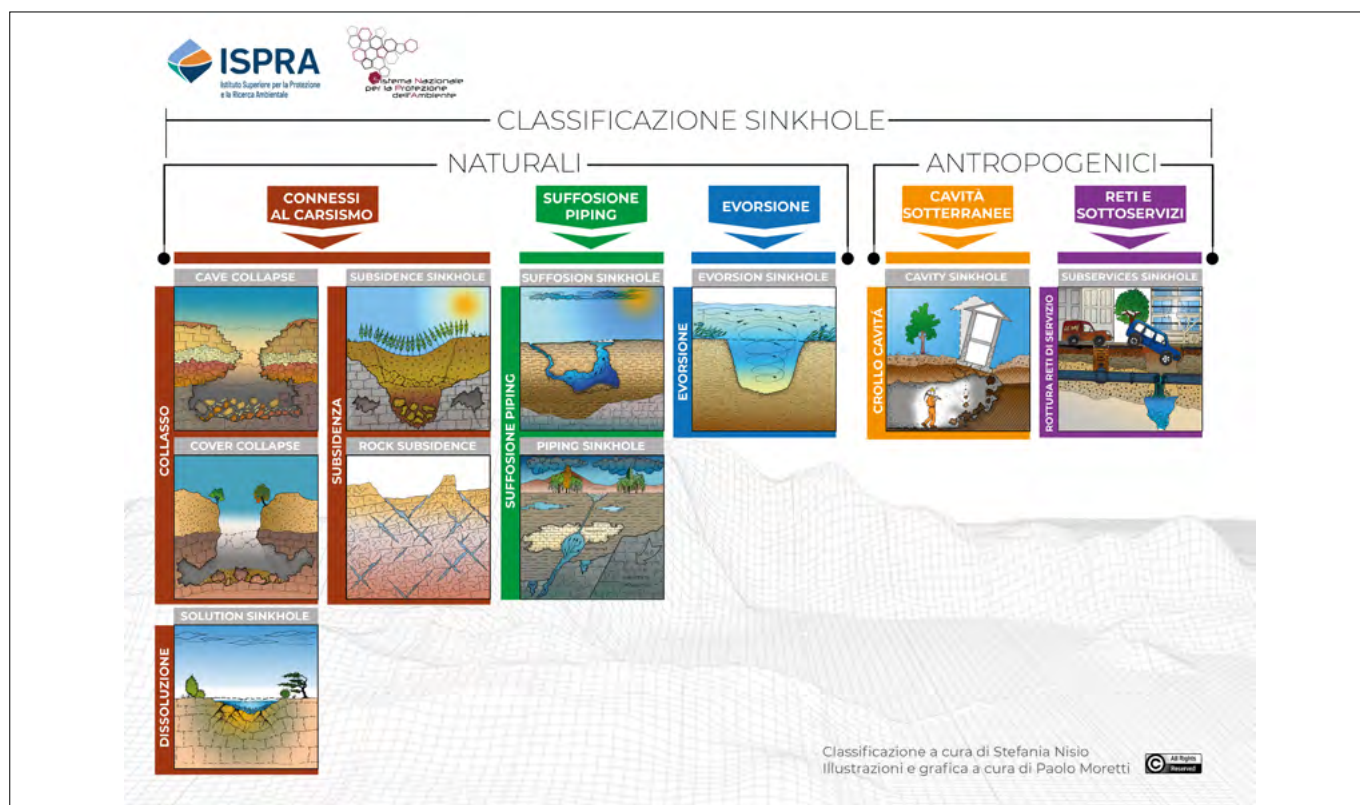


Figura 5. Classificazione ISPRA dei sinkhole, a cura di S. Nisio

I sinkhole di origine carsica corrispondono alle doline, che si originano per fenomeni 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*.

I *sinkhole di suffosione* superficiale sono 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” 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, evolvono in tal senso fino allo sprofondamento in superficie.

Tra i meccanismi genetici, afferenti ai fenomeni naturali, il più peculiare è il *deep piping sinkhole* ovvero una voragine generata da fenomeni di erosione che procedono dal basso. Si tratta di un processo di *suffosione profonda*, che si realizza quando l’acqua all’interno dei terreni è abbondante e in pressione, riuscendo così a trovare vie di scorrimento e a provocare l’erosione attraverso la formazione di canalicoli a sviluppo sub-orizzontale e di condotti verticali lungo le linee di maggiore debolezza del territorio.

I *piping sinkhole* non sono strettamente correlati al carsismo, poiché si originano al di sopra di una potente copertura di terreni sedimentari semi-permeabili al tetto del bedrock. Gli spessori dei sedimenti di copertura, per lo più costituiti da alluvioni miste con alternanze di intervalli a differente granulometria, sono generalmente prossimi ai cento metri, a volte superano ampiamente tali valori.

La differenza sostanziale tra un *deep piping sinkhole* e un processo di erosione carsica è pertanto il verso inverso operato dall’erosione attraverso la risalita di fluidi in pressione dal basso verso l’alto mediante la genesi di un condotto o *pipe*.

I 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 piane 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, 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 NATURALI IN ITALIA

I fenomeni naturali censiti in Italia si concentrano in conche intramontane, valli alluvionali e in pianure costiere; subordinatamente alcuni fenomeni sono stati rinvenuti su fasce pedemontane di raccordo con aree di pianura ed in piccole depressioni intracollinari. Per molti sinkholes censiti è stata ipotizzata una stretta connessione con meccanismi di risalita di fluidi mineralizzati.

Le aree italiane suscettibili ai sinkholes naturali si concentrano sul medio versante tirrenico ed in particolare nelle regioni del Lazio (Meloni *et al.* 2013 a, b, 2015; Ciotoli *et al.* 2015 a, b), Abruzzo, Campania e Toscana (Del Prete *et al.* 2008; Nisio 2008, c, d, e). Il versante adriatico, a causa del proprio assetto geologico-strutturale, non è interessato da questo tipo di sinkholes, così come l’arco Alpino e le Dolomiti.

In Italia settentrionale le condizioni sono differenti: nelle pianure del Veneto ed in Emilia-Romagna, soprattutto



Figura 6. Sinkhole antropogenico 2011 nel parco della Caffarella Roma

in Pianura Padana alla confluenza del Po con l'Adige, sono presenti molti piccoli laghi di forma sub-circolare la cui formazione è imputabile a processi di *evorsione* (fenomeni erosivi legati a turbolenze ad asse verticale) a carico di corpi sedimentari caratterizzati da discreti spessori di materiali sabbiosi e/o a processi di liquefazione e *suffosione*.

In Emilia Romagna e in Lombardia sono inoltre diffuse voragini di piccolo diametro e modesta profondità (chiamate localmente "occhi pollini") i cui meccanismi genetici sono comparabili con la *suffosione* superficiale. Nelle pianure e conche interne del Veneto, del Friuli, della Provincia Autonoma di Bolzano i fenomeni di sprofondamento sono strettamente controllati dalla dissoluzione di litotipi evaporitici e carbonatici che si rinvenivano al di sotto di una copertura generalmente di modesto spessore, riconducibili per lo più a tipologie di *cover-collapse sinkhole* (Calligaris *et al.* 2019).

I fenomeni segnalati in Calabria, invece, sono riconducibili a depressioni, di diametro estremamente variabile, oggi ricolmate e pertanto di difficile ubicazione, originatesi, nella totalità dei casi, durante eventi sismici e connesse a fenomeni di liquefazione dei terreni (Iovine e Parise, 2008).

Il contesto geologico appare sostanzialmente differente in Sicilia (Nisio; 2008 e, h) e in Puglia in cui i casi di sprofondamento sono condizionati dalla presenza di terreni evaporitici (gesso e sale) o calcarei e da coperture argillose o sabbiose di spessore più modesto (Parise, 2008).

Casi particolari si rinvenivano nella Liguria (fenomeno delle *sprugole* Nisio,

2008 g), mentre il contesso appare molto variabile nella Sardegna dove ai fenomeni naturali, frequenti nella pianura del Campidano, si sommano i sinkhole antropogenici dovuti all'estrazione mineraria.

I risultati finora raggiunti sui fenomeni censiti hanno permesso di individuare con maggiore precisione il contesto geologico-strutturale ed idrogeologico delle aree suscettibili ai sinkholes in Italia.

Caratteristica ricorrente in molte delle aree suscettibili è la presenza di faglie attive. Lungo esse, infatti, è stato possibile riconoscere allineamenti di sinkholes e di raggruppamenti di fenomeni.

I SINKHOLE ANTROPOGENICI IN ITALIA

I sinkholes antropogenici sono provocati dal crollo di cavità antropiche presenti nel sottosuolo di molte aree urbane italiane, sono responsabili di numerosi danni alle infrastrutture, al patrimonio edilizio, con perdita talvolta di vite umane.

I sinkholes antropogenici prevalgono, invece, nelle grandi città metropolitane, quali Roma (Fig. 6) e Napoli, e sono dovuti oltre alla presenza di cavità sotterranee realizzate dall'uomo a vario titolo (Basso *et al.* 2013; Tufano *et al.* 2021, 2022) alla disfunzione della rete dei sottoservizi.

Le tipologie di cavità artificiali presenti in Italia sono molte, alcune di esse sono caratteristiche e tipiche di particolari realtà regionali.

I vuoti sotterranei sono stati realizzati principalmente per ricavare materiali da costruzione. L'estrazione di rocce pi-

roclastiche come materiali per l'edilizia è stata diffusa nel Lazio ed in Campania; l'estrazione di inerti per i calcestruzzi, di sabbie e ghiaie per vari usi, ha prevalso nel Lazio, in Abruzzo ed in Puglia (Nisio, 2015; Madonna *et al.*, 2020, 2022). Rocce calcaree particolarmente tenere sono state estratte sin da tempi preistorici da cave in sotterraneo della Puglia, della Sicilia e della Lombardia. Altre grandi cavità nel sottosuolo sono state realizzate per l'estrazione di minerali (gessi, sale, argento, pirite, oro ed altri metalli, carbone), prevalentemente in Sicilia, Calabria, Lombardia, Trentino Alto Adige, Toscana, Sardegna.

Inoltre, intricata rete caveale è stata realizzata al di sotto di molti centri urbani per la realizzazione di cisterne, serbatoi e cunicoli idraulici e per la costruzione di luoghi di culto sotterranei.

Non meno diffusa risulta la pratica antica di realizzare grotte utilizzate dapprima come rifugi di pastori e bestiame e, successivamente, nelle vicinanze o sopra a tali luoghi sono stati realizzati edifici ed abitazioni civili e le grotte utilizzate come cantine e depositi (Abruzzo, Marche, Basilicata, Puglia e Lazio).

Di tali reti caveali, che costituiscono a volte città sotterranee sotto la città, si è persa memoria, ovvero non sono adeguatamente riportate su cartografia specifica; tuttavia, esse sono ancora attive o sepolte da terreni di riporto facilmente asportabili per dilavamento.

La presenza di tali vuoti antropici ovviamente facilita l'innescio di sprofondamenti di superficie che si perpetua in molti centri urbani da anni. A tali episodi si aggiungono sprofondamenti connessi a fenomeni naturali di dissoluzione carsica particolarmente spinti in formazioni litologiche evaporitiche o carbonatiche (particolarmente diffuse in Friuli Venezia Giulia, Sicilia e Puglia).

Inoltre, bisogna tener presente che il mancato controllo e la messa in sicurezza di tali cavità potrebbe amplificare gli effetti di eventuali sismi.

I database realizzati a livello nazionale sinora in Italia risultano inadeguati sulle effettive realtà del fenomeno per tali tipologie di sinkhole e per il rischio ad essi associato è necessaria una conoscenza più approfondita del sottosuolo e l'esatta ubicazione delle cavità presenti al di sotto del tessuto urbano.

CONCLUSIONI

I fenomeni di sinkhole in Italia diventano sempre più frequenti. Tale aumento del numero dei casi è probabilmente correlabile anche al variato regime pluvio-

metrico che vede la concentrazione delle piogge in alcuni periodi dell'anno.

Nonostante sia un fenomeno così diffuso, i sinkholes non sono stati ancora studiati adeguatamente e a fatica riescono ad essere considerati nei piani di bacino o nelle mappature relative alla microzonazione sismica.

Alcune problematiche restano aperte tra cui la terminologia nonché il difficile compito di realizzare una classificazione italiana condivisa tra tutti gli specialisti del settore.

È stata proposta una classificazione in base alla casistica italiana che tiene conto in modo semplice delle varie forme e processi di sprofondamento che caratterizzano le diverse realtà regionali.

Mancano, tuttavia, delle linee guida per lo studio, l'intervento e il monitoraggio dei fenomeni, ad utilizzo degli enti locali e dei professionisti che lavorano su questo settore.

Nel 2023 è stato, a tal proposito, istituito in seno a Ispra un gruppo di ricerca per la realizzazione delle *Linee guida dei sinkhole e delle cavità sotterranee*, costituito con specialisti Ispra (del Dipartimento del Servizio geologico d'Italia), le Università Italiane, il CNR, che si interfacerà con il tavolo ISPRA - Regioni in materia di sinkhole e cavità sotterranee nonché con la Piattaforma in seno al Consiglio Nazionale Geologi.

Il lavoro di tali specialisti rappresenterà il primo contributo unitario in materia di Sinkhole e cavità sotterranee.

BIBLIOGRAFIA

- ALBANESI M., NISIO S., PICUTI M. R., SCARPIGNATO M. (2013), *I sinkholes della piana di Bevagna. Un nuovo caso di studio*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 21-40.
- 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.
- CALLIGARIS C., ZINI L., NISIO S., PIANO C. (2019), *Sinkholes in the Friuli Venezia Giulia Region: state of the art of the of territorial analyses in the evaporites*. Springer Book "Applied Geology: Approaches to Future Resource.
- CARAMANNA G., CIOTOLI G., NISIO S. (2008), *A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas*. Journal of Natural Hazard, 45, 145- 172, DOI 10.1007/s, 11069-007-9165-7.
- CIOTOLI G., DI LORETO E., LIPERI L., MELONI F., NISIO S., SERICOLA A. (2015a), *Carta dei Sinkhole Naturali del Lazio 2012 e sviluppo futuro del Progetto Sinkholes Regione Lazio*. Mem. Descr. Carta Geol. D'It. 99, 189-202.
- CIOTOLI G., FINOIA M. G., LIPERI L., MELONI F., NISIO S., TONELLI V., ZIZZARI P. (2015b), *Sinkhole susceptibility map of the Lazio Region, central Italy*. Journal of Maps 12-2, 287-294, 1/2015
- DEL PRETE S., GUARINO P. M., NISIO S., SANTO A. (2008), *I sinkhole in Campania*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV, 149-209.
- FAIRBRIDGE (1968), *The Encyclopedia of Geomorphology*. Ed. Reinhold, New York, 1968, 1295 pp.
- GUARINO P. M., NISIO S., SANTO A. (2008), *I sinkhole nelle aree di Pianura in Italia: considerazioni sugli aspetti genetici ed evolutivi*. GUTIÉRREZ F., CALAFORRA J., LUCH P. (2008), *A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain*. Environ Geol. 53, 993-1006.
- GUTIÉRREZ F., GUERRERO J., LUCHA P. (2007), *A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain* Environmental Earth Sciences 53(5):993-1006
- IOVINE G., PARISE M. (2008) – I SINKHOLE IN PUGLIA . NISIO S. (2008), *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV; 335-383.
- MADONNA S. & NISIO S. (2021), *Piccoli laghi d'Italia: un rischio naturale nascosto nelle rappresentazioni pittoriche e iconografiche*. Mem. Descrittive della carta geologica d'Italia. Vol 108.
- MADONNA S., NISIO S. (2020), *Il lago di Turno scomparso nella provincia di Roma*. Mem. Descrittive della Carta Geol. d'Italia Vol. 106, 221-232.
- MADONNA SERGIO, NISIO STEFANIA, GANDIN ANNA (2020a), *Le cavità nascoste nei "calcareous tufa" del sottosuolo di Rieti*. Mem. Descrittive della carta geologica d'Italia. Vol 107, 357-382.
- MADONNA S., NISIO S., NAPPI G. (2020b), *Le Cavità antropiche presenti nel sottosuolo di Bolsena* Mem. Descrittive della carta geologica d'Italia. Vol 107, 383-396.
- MADONNA S., NISIO S., ROMAGNOLI G., SCARDOZZI G., VESSELLA F. (2022), *Da Sorrina Nova a Viterbo: geologia, archeologia e rischi geologici di una straordinaria città d'arte* Memorie Descrittive della Carta Geol- d'It. 109, 137-156.
- MELONI F. & NISIO S. (2015), *Catalogo dei Sinkhole Antropogenici del Lazio 2013 ed organizzazione delle attività future*. 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. (2013 a), *Il Catalogo unificato dei sinkholes della regione Lazio*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93, 321-354.
- MELONI F., NISIO S., LIPERI L., TONELLI V., ZIZZARI P., CIOTOLI G. (2013 b), *Carta dei sinkholes della Regione Lazio*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 93.
- NISIO S. (2003), *I fenomeni di sprofondamento: stato delle conoscenze ed alcuni esempi in Italia Centrale*. Il Quaternario, 16 (1) 2003, 121-132.
- NISIO S. (2008 a), *I fenomeni naturali di sinkhole nelle aree di pianura italiane*. Monografia Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV; 475pp.
- NISIO S. (2008 b), *I sinkhole: problemi terminologici, meccanismi genetici, classificazione*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV, 17-32.
- NISIO S. (2008 c), *I sinkhole nel Lazio*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV, 33-143 c.
- NISIO S. (2008 d), *I sinkhole in Toscana*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV, 213-267.
- NISIO S. (2008 e), *I sinkhole in Abruzzo*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV, 269-307.
- NISIO S. (2008 f), *I sinkhole in Sardegna*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV, 387-398.
- NISIO S. (2008 g), *I sinkhole in Liguria*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV, 399-408.
- NISIO S. (2008 h), *I sinkhole nelle altre regioni*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV, 419-426.
- NISIO S., CARAMANNA G., CIOTOLI G. (2007), *Sinkholes hazard in Italy: first results on the inventory and analysis of some case studies*. In: Parise & Gunn (eds) Natural and Anthropogenic Hazards in Karst areas: Recognition, Analysis and Mitigation. Geological Society, London, Special Publications, 279, 23-45.
- NISIO S. & SALVATI R. (2004), *Fenomeni di sprofondamento catastrofico. Proposta di classificazione applicata alla casistica italiana*. Atti Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio Roma 20-21 maggio 2004", 573-584.
- NISIO S. (2014), *I sinkholes tra storia, mito e leggenda*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 96, 271-296
- NISIO S. (2014), *Le ricerche storiche nello studio dei fenomeni di sprofondamento*. Mem. Descr. Carta Geol. D'IT. 96, 261-270
- NISIO S. (2019), *La Carta delle cavità Antropogeniche di Roma Capitale*. Quaderno Ordine degli ingegneri di Roma, pp. 20-31.
- PARISE M. (2008), *I sinkhole in Puglia*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'It. Vol. LXXXV; 309-332.
- TUFANO R., GUERRIERO L., ANNIBALI CORONA M., BAUSILIO G., DIEGO DI MARTIRE, NISIO S., CALCATERRA D. (2021), *Anthropogenic sinkholes inventory of the city of Naples, Italy: an update*. Natural Hazard.
- TUFANO R., GUERRIERO L., ANNIBALI CORONA M., BAUSILIO G., DI MARTIRE D., NISIO S., CALCATERRA D. (2022), *I sinkholes antropogenici nel territorio di Napoli: aggiornamento dell'inventario ai fini della valutazione di suscettibilità. Anthropogenic sinkholes in the city of Naples: updating of the inventory for susceptibility analysis*. Memorie Descrittive della Carta Geol- d'It. 109, 321-332.
- WALTHAM, A. C. & FOOKES, P. G. (2003), *Engineering classification of karst ground conditions*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 36, 101-118.
- WALTHAM T., BELL F. G. CULSHAW M. (2005), *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks*. in Engineering and Construction Chapter Praxis Publishing Springer.

Mappatura dei rischi idrogeologici e del rischio al cambiamento climatico per le infrastrutture

Hydrogeological and climate change risk mapping for infrastructure

Parole chiave: rischi geologici, trasformazione digitale, cambiamento climatico, monitoraggio, infrastrutture

Key words: geological risks, digital transformation, climate change, monitoring, infrastructures

Serena Pantaneschi
E-mail: serena.pantaneschi@etsingegneria.it

Maria Giovanna Camuti
E-mail: mariagiovanna.camuti@etsingegneria.it

Mario Calicchio
E-mail: mario.calicchio@etsingegneria.it

Federico Foria
E-mail: federico.foria@etsingegneria.it

Gabriele Miceli
E-mail: gabrielemiceli@etsingegneria.it

ETS S.r.l.

1. INTRODUZIONE

La relazione tra il cambiamento climatico e l'aumento del rischio geoidrologico e delle alluvioni in Europa è stata evidenziata da uno studio della Vienna University of Technology, pubblicato nel 2019 sulla rivista Nature¹, in particolare per l'Europa nord-occidentale. I danni a livello europeo sono stimati a oltre 100 miliardi di dollari ogni anno. Secondo i dati del Climate Risk Index di Germanwatch² (2), per l'Italia si parla di 19.947 vittime dal 1999 al 2018 per eventi meteorologici estremi (sesto posto a livello mondiale).

Eventi catastrofici come frane e alluvioni possono avere un impatto significativo sulla società, in termini di pericolo per la vita, incidendo sulle attività umane e sull'operatività delle infrastrutture che ne sono alla base.

Prevenire eventi di grande portata può evitare ingenti danni non solo di tipo tecnico, ma anche di impatto sociale ed economico. Tali danni possono essere evitati o resi più gestibili da un corretto sistema di segnalazione e programmazione dell'allertamento e della manutenzione, sia essa ordinaria o straordinaria, nel rispetto dell'ambiente e del valore storico e sociale che le infrastrutture rappresentano.

L'approccio MIRETS consente l'analisi degli elementi concentrando su un flusso di lavoro integrato per collegare i dati di rilievo-ispezione per la geologia, la digitalizzazione, la diagnostica e la progettazione (Foria *et al.*, 2021a) (Fig. 1).

Viene adoperato un sistema di gestione e manutenzione per mantenere in efficienza l'infrastruttura ferroviaria,



Figura 1. Puzzle-chart della metodologia e delle milestones del MIRET: Rilievo e Ispezione (SI), Digitalizzazione (DI), Analisi delle Priorità (PA), Pianificazione e Progettazione (PD), Lavori e Manutenzione (WM), Monitoraggio (MO)

assicurando i massimi standard di qualità, sicurezza e affidabilità, garantendo la compatibilità dei costi con le risorse a disposizione.

2. ANALISI DI PRIORITÀ DEI VERSANTI E DELLE SCARPATE, AMBIENTE DIGITALE E ANALISI DEI DATI

La fase iniziale, definita "Analisi di Priorità dei versanti e delle scarpate", consiste nella raccolta dei dati con lo scopo di ottenere il quadro sinottico dello stato di fatto in cui versa l'infrastruttura. La raccolta dei dati (Fig. 2) è organizzata su più livelli.

- Analisi bibliografica. Consiste nella raccolta di dati esistenti (carte geologiche, inventari ufficiali delle frane, dati di spostamento superficiale (InSAR) dal Geoportale Nazionale,

dati meteorologici e altre fonti di GeoData aperte). Dall'analisi di tali dati è possibile valutare l'estensione e lo stato di attività del fenomeno considerato, nonché rilevare fenomeni non mappati.

- Rilievi Lidar. Esecuzione di voli effettuati lungo la linea ferroviaria, su un corridoio largo circa 400 m, da cui è possibile ottenere un DTM (Digital Terrain Model) e DSM (Digital Surface Model) ad alta risoluzione dell'area (pixel di 50 cm) e un'ortomagine dettagliata (pixel di 10 cm).
- ARCHITA. Sistema mobile mapping sviluppato da ETS per il rilievo delle pendenze delle trincee, generalmente visibili solo dalla linea (Foria *et al.*, 2019). È un sistema multidimensionale, che permette di acquisire informazioni simultanee

1 <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1495-6>

2 <https://www.germanwatch.org/en/17307>

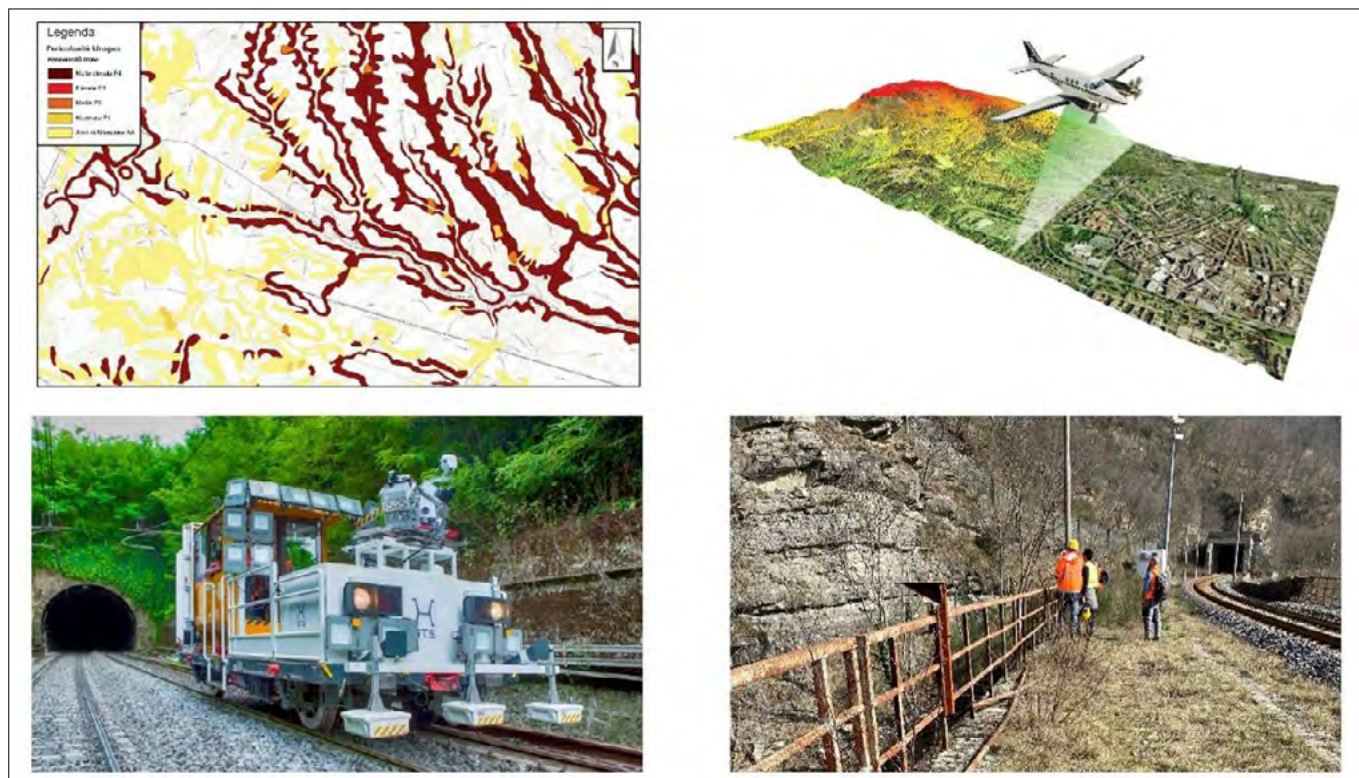


Figura 2. Raccolta dati. In alto a sinistra l'analisi bibliografica, in alto a destra rilievo con Airborne Lidar, in basso a sinistra rilievo mobile mapping, in basso a destra ispezioni in linea

e integrate con l'impiego di diverse tecnologie, quali: laser scanner, georadar, termocamere e fotografie ad alta definizione. L'acquisizione dei dati avviene con limitato disturbo della circolazione del traffico, in quanto il sistema permette di rilevare l'intera infrastruttura a velocità sostenuta (i.e. 15-30 km/h) con un unico passaggio. I dati ottenuti da rilievo laser scanner e Lidar possono essere integrati/sovrapposti grazie al metodo di georeferenziazione ad alta precisione adottato per i sistemi di rilevamento.

- In-Line Inspection (ILI). Ispezione lungo la linea ferroviaria finalizzata alla raccolta di dati in campo (rilievi geologici e geomorfologici locali; evidenze di processi geomorfologici in atto; verifica delle opere/strutture di bonifica dei pendii esistenti e loro condizioni). Inoltre, ci si avvale dei risultati provenienti da indagini geognostiche e strutturali, comprendenti prelievo di campioni per esecuzione di prove di laboratorio di suolo e meccanica delle rocce, finalizzate alla definizione dei parametri costitutivi per l'analisi preliminare di stabilità dei pendii su ogni porzione considerata.

L'integrazione di queste informazioni ci permette di eseguire: analisi avanzate sulla caratterizzazione degli elementi attraverso la determinazione delle discontinuità e del comportamen-

to strutturale dell'ammasso roccioso; valutazione della stabilità dei versanti con il calcolo del SMR (Slope Mass Rating); analisi geomorfometrica per analizzare il modello di espansione e analisi geotecnica (terreni) e cono d'ombra (caduta massi). Queste sono solo alcune delle componenti di questo servizio per calcolare l'impatto sulla linea ferroviaria.

I dati vengono digitalizzati e combinati in complesse analisi che consentono

la mappatura dei versanti e delle scarpate lungo la linea ferroviaria attraverso l'identificazione della probabilità spaziale di accadimento delle frane e di altri eventi critici con una Analisi Spaziale Multicriteria (SMCA) (Foria *et al.*, 2021b). Al fine di effettuare l'SMCA, il tratto di linea ferroviaria indagato viene suddiviso in segmenti della lunghezza di 10 metri ciascuno, analizzando separatamente il lato destro da quello sinistro. L'indi-

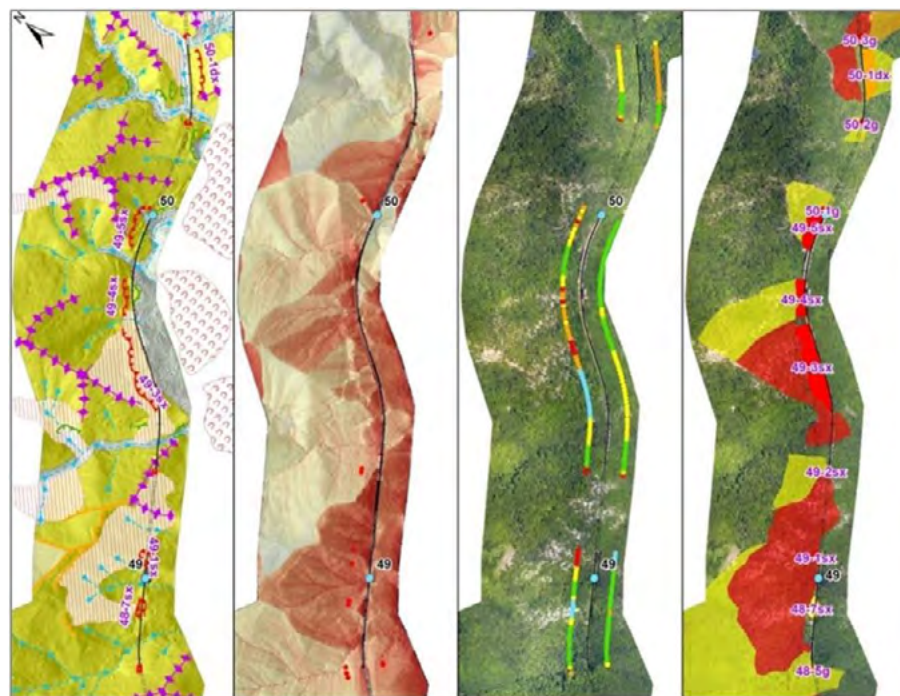


Figura 3. Un esempio di Analisi di Priorità per la gestione dell'infrastruttura ferroviaria. La figura mostra un'applicazione per le frane. Da sinistra a destra: Carta Geomorfologica, Carta dell'Indice di Connettività (i punti rossi indicano il superamento di un valore di soglia), Valore dell'Indice finale, calcolato ogni 10 m lungo la linea, su entrambi i lati, e Carta di Priorità (Foria *et al.*, 2021b)

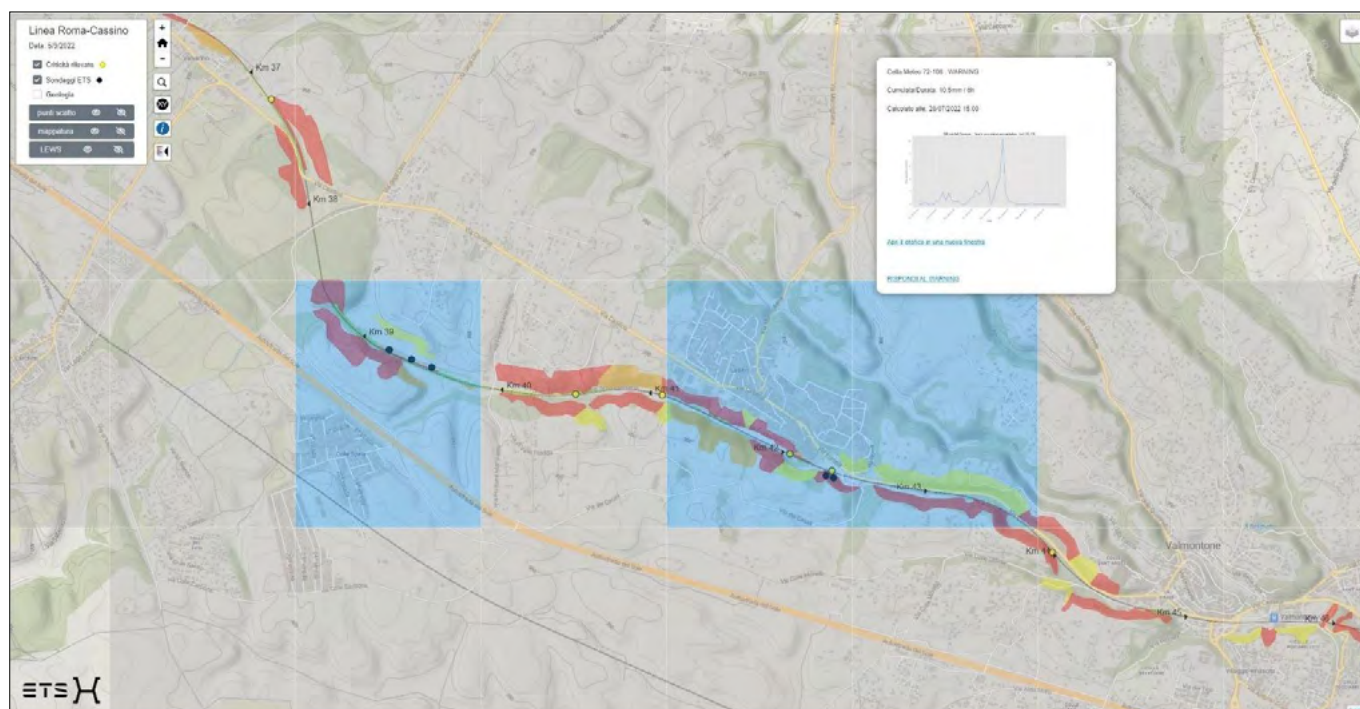


Figura 4. Visualizzazione piattaforma WebGIS con indici di priorità e EWS, della linea ferroviaria Roma-Cassino

cattore viene calcolato con un algoritmo procedurale che tiene conto di diversi parametri (Calicchio *et al.*, 2022) e che permette di definire l'Indice di Priorità, ossia il livello di attenzione o condizione che determina l'ordine di gestione degli elementi infrastrutturali in base alla loro importanza relativa. Gli indici ottenuti rientrano in quattro Classi di Priorità che consentono di stabilire quali settori della linea ferroviaria hanno priorità maggiore rispetto ad altri: Non prioritaria (verde); Priorità 3 (gialla); Priorità 2 (arancione); Priorità 1 (rosso).

Tutti i dati analizzati sono georeferenziati, organizzati in un geodatabase e disponibili su una piattaforma WebGIS sviluppata da ETS. Tale strumento consente la consultazione dei risultati delle analisi e permette la visualizzazione e la gestione del rischio delle priorità, con possibilità di utilizzo da parte di qualsiasi utenza abilitata.

3. CASO STUDIO

La metodologia sopra descritta è stata applicata alla tratta Capannelle-Anagni della linea ferroviaria Roma-Cassino al fine di ottenere la Carta delle Priorità di intervento per la protezione da eventuali fenomeni di instabilità di versante.

All'interno della piattaforma è stato implementato anche un sistema di Early Warning per prevedere le frane in base alle previsioni di pioggia e al monitoraggio locale. I sistemi di monitoraggio e di allerta precoce sono soluzioni studiate su misura in base alle esigenze del cliente.

Per avere un quadro completo dei fenomeni di instabilità sono state effettuate due diverse analisi, rispettivamente per le scarpate ferroviarie e per i versanti sovrastanti queste ultime.

Nel primo caso, gli indici per le verifiche di stabilità sono calcolati tenendo conto della morfologia degli elementi, in termini di pendenza e di altezza; tali verifiche vengono svolte considerando sia un contesto di frana e scivolamento sia un contesto di crollo.

Per i versanti, caratterizzati da morfologie e geometrie molto variabili, nonché da una distanza variabile dalla linea ferroviaria, è stato utilizzato un approccio differente; questo è basato sul calcolo della possibilità che il materiale mobilizzato sulla scarpata possa geometricamente raggiungere la massicciata.

L'SMCA ha fornito un quadro generale delle problematiche riguardanti la linea, mediante il calcolo di un indicatore che esprime la propensione al dissesto per ciascun tratto elementare di linea; quindi, è stato possibile definire un elenco di interventi prioritari e progettare opere di protezione più appropriate.

Il flusso di lavoro MIRETS, con mappatura delle Priorità e approccio pianificatorio-progettuale integrato, può essere esteso ad altre strutture lineari, come strade, oleodotti, linee elettriche.

Questo approccio risulta ancora più efficace considerando anche le variazioni climatiche che si stanno osservando negli ultimi anni.

In particolare, nelle aree caratterizzate da una maggiore predisposizione

al dissesto idrogeologico, eventi meteorologici di notevoli intensità possono determinare condizioni di criticità significative.

Un sistema di allertamento, che permette di segnalare in tempo reale eventi piovosi sopra soglia, permetterebbe di gestire tempestivamente scenari potenzialmente pericolosi, pianificare interventi atti alla mitigazione del rischio idrogeologico e prevenire danni-interruzioni del servizio ferroviario.

La piattaforma WebGIS consentirà agli utenti di visualizzare e interrogare i dati e di interagire con il sistema, fornendo feedback sugli avvisi automatici generati dal REWS, supportando la calibrazione e l'ottimizzazione dei valori di soglia e degli scenari di riferimento.

BIBLIOGRAFIA

- CALICCHIO M., PANTANESCHI S., FORIA F., MICELI G. (2022), *Analisi delle priorità per la protezione delle linee ferroviarie dal rischio frane*.
- FORIA F., GIORDANO R., AVANCINI G. & MICELI G. (2021a), *Mitigation measures Analysis for the protection of coastal railways in the Flysch of Western Liguria*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 833(1).
- FORIA, F., MICELI, G., TAMBURINI, A., VILLA, F., RECH, A. & EPIFANI, F. (2021b), *Application of Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA) to assess rockfall hazard and plan mitigation strategies along long infrastructures*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 833(1).
- FORIA F., PALTRINIERI E., AVANCINI G., TERRILE L. (2021), *Processi e tecnologie per la gestione del dissesto idrogeologico e del rischio alluvioni nelle infrastrutture*.

Affidabilità e miglioramento degli inventari franosi esistenti: caso di studio del Subappennino Dauno (Puglia, Italia Meridionale)

Reliability and improvement of existing landslide inventories: the case study of the Subappennino Dauno (Puglia, Southern Italy)

Parole chiave: mappatura, frana, pericolosità, rischio
Key words: inventories, landslide, hazard, risk

Alessandro Parisi
Politecnico di Bari, Dipartimento di
Ingegneria Elettrica e dell'informazione
(DEI)
E-mail: alessandro.parisipoliba.it

Ilenia Argentiero
CNR - Istituto per il Rilevamento
Elettromagnetico dell'Ambiente
(CNR - IREA)

Roberta Pellicani

Giuseppe Spilotro
CNR - Istituto per il Rilevamento
Elettromagnetico dell'Ambiente
(CNR - IREA);
Società Italiana di Geologia Ambientale
(SIGEA)

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, la crescente consapevolezza della comunità internazionale sul tema della *disaster risk reduction* è testimoniata dalla ratifica di accordi, linee guida e la definizione di obiettivi multi-scala con l'intento di ridurre gli impatti sociali, economici, sanitari, culturali e ambientali a breve, medio e lungo termine causati dall'occorrenza di fenomeni naturali e/o antropogenici attraverso azioni condivise. Tra questi, il *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction* ha definito quattro priorità d'azione, tra cui la comprensione del rischio e delle sue componenti, al fine di raggiungere sette obiettivi globali come la riduzione della mortalità, degli impatti sociali ed economici dovuti all'occorrenza di fenomeni calamitosi (UNISDR, 2015). Nonostante la sensibilizzazione dell'opinione pubblica e delle istituzioni, l'occorrenza di tali fenomeni continua ad avere un impatto significativo sulle comunità e sui beni dislocati sul territorio, minando gli sforzi per il raggiungimento dello sviluppo sostenibile.

Le frane pluvio-indotte sono una delle principali tipologie di fenomeni calamitosi naturali che colpiscono il territorio italiano a causa delle caratteristiche geomorfologiche e geo-strutturali delle zone montane e collinari (Catenacci, 1992; Crosta *et al.*, 2005). Esse costituiscono una seria minaccia, a causa della loro numerosità, intensità e frequenza, per la popolazione ed i loro beni, in particolare con riferimento a quei territori nei quali gli insediamenti antropici si sono spinti in aree un tempo non antropizzate, in quanto ad elevata pendenza e dubbia stabilità. Le frane possono causare danni improvvisi o lenti agli elementi esposti in funzione della tipologia di

cinematismo. Inoltre, il loro potenziale movimento preclude la ricostruzione all'interno di aree colpite, a meno che non vengano adottate misure di stabilizzazione. Anche in questo caso, tali sforzi non sono sempre una garanzia di successo (Aleotti & Chowdhury, 1999; Van Den Eeckhaut e Hervás, 2012).

Al fine di quantificare la pericolosità e il rischio da frana, la catalogazione degli eventi occorsi e la successiva derivazione di mappe di pericolosità e di rischio costituiscono strumenti fondamentali per la gestione di territori proni a questo tipo di calamità (Fell *et al.*, 2008; Varnes e IAEG-CLOMMS, 1984). Gli inventari costituiscono un registro dettagliato degli eventi franosi del passato e dei suoi impatti in una determinata area. Al fine di costituire uno strumento utile per la valutazione e gestione del rischio, essi dovrebbero essere i più completi possibile (van Westen *et al.*, 2008). Le principali informazioni richieste riguardano la località, il tipo di frana, la data di occorrenza o dell'ultima riattivazione, lo stato di attività e il volume. Altre informazioni complementari possono essere la geometria della frana, la geologia, l'idrogeologia, l'uso del suolo, i fattori scatenanti, le conseguenze, le misure di mitigazione, i metodi e la data di rilevamento, il nome del rilevatore, i riferimenti bibliografici, le illustrazioni, le fotografie al suolo o aeree e dati di monitoraggio (Fell *et al.*, 2008; Van Den Eeckhaut e Hervás, 2012).

La disponibilità e l'accuratezza di informazioni spazio-temporali relative agli eventi franosi presenti negli inventari esistenti è tra i principali fattori che influenzano la scelta dell'approccio metodologico per la valutazione della pericolosità e del rischio da frana (Coromi-

nas *et al.*, 2014). Di fatto, la criticità nel derivare accurate mappe di pericolosità è principalmente legata dalla limitata disponibilità di informazioni temporali nelle banche dati di frane esistenti. Da ciò ne consegue che la valutazione della pericolosità da frana spesso si limita alla sola componente spaziale (suscettibilità), escludendo la valutazione della frequenza temporale di accadimento dei fenomeni franosi (van Westen *et al.*, 2006).

Tale limitazione è evidenziata anche a livello normativo in Italia. Di fatto, nonostante il DPCM 28 maggio 2015 "Individuazione dei criteri e delle modalità per stabilire le priorità di attribuzione delle risorse agli interventi di mitigazione del rischio idrogeologico" identifichi la frequenza temporale come uno dei criteri cardine per l'eleggibilità degli interventi di mitigazione del rischio, tale criterio è sostituito dalla velocità del cinematismo, discriminando tra fenomeni lenti o rapidi come meno o più pericolosi, escludendo la frequenza temporale di accadimento dei fenomeni franosi dai criteri di eleggibilità degli interventi di mitigazione del rischio da frana.

Alla luce di quanto evidenziato, questo lavoro, in prosecuzione di una pluridecennale attività di ricerca, e con l'ausilio di preziosi archivi multi-temporali offerti dalle tecnologie di *remote sensing*, offre uno studio di dettaglio su un'area prona a questo tipo di calamità naturale, situata in Italia meridionale (Subappennino Dauno, Regione Puglia). In particolare, si è cercato di ricostruire quali sono i cataloghi di frane attualmente disponibili per l'area di studio, per poi focalizzarsi sulla raccolta di dati storici spazio-temporali di accadimento di fenomeni franosi a partire da documenti raccolti presso l'ufficio regionale Difesa del Suo-

lo della Regione Puglia. Tale raccolta ha consentito di ottenere informazioni complete a diverso grado di accuratezza spazio-temporale in grado di arricchire le attuali conoscenze nell'area oggetto di studio. Esse possono essere considerate una base informativa utile sia per valutazioni della pericolosità e del rischio da frana più accurate, sia al fine di calibrare e validare algoritmi semi-automatici di *change detection* del territorio.

2. CASO DI STUDIO: SUBAPPENNINO DAUNO (REGIONE PUGLIA, ITALIA MERIDIONALE)

2.1 INQUADRAMENTO

Il Subappennino Dauno (Fig. 1) rappresenta la porzione occidentale della Daunia, un'unità territoriale situata nella parte nord-occidentale della regione Puglia (Italia meridionale). Quest'area è caratterizzata da inverni freddi ed estati miti, e precipitazioni abbondanti da novembre a febbraio. La media totale delle precipitazioni annue è di circa 800 mm, mentre la temperatura media annua è di circa 12 °C, con variazioni mensili da 2°C a 21 °C. La sua altitudine varia dal livello del mare (corrispondente alla costa adriatica nella parte settentrionale) fino ai 1.152 m s.l.m. del Monte Cornacchia, determinando la presenza di paesaggi montani, collinari e costieri. In termini di uso del suolo, i seminativi caratterizzano i versanti inferiori prospicienti la pianura del Tavoliere, mentre i versanti a quote più elevate sono occupati da un mosaico frammentato di boschi di latifoglie e aree con vegetazione erbacea utilizzate come pascolo (Pellicani *et al.*, 2014, Regione Puglia, 2015). La maggior parte degli insediamenti urbani di questa porzione di territorio si trova nella parte alta delle colline ivi presenti (Tab. 1). Questi centri sono separati da valli scoscese e caratterizzate da fenomeni di instabilità franosa, e conservano le strutture tipiche dei borghi fortificati del Medioevo. Sul versante orientale del Subappennino Dauno, verso la pianura del Tavoliere, il paesaggio tende ad assumere una conformazione più dolce, evolvente a pianeggiante e gli insediamenti urbani sono più estesi (Regione Puglia, 2015).

Il quadro geologico-strutturale dell'area è legato alla storia geologica dell'Appennino meridionale ed è caratterizzato da un'ampia varietà di formazioni con proprietà meccaniche molto diverse (successioni rocciose e argille), interagenti tra loro e spesso fortemente piegate e fagliate.

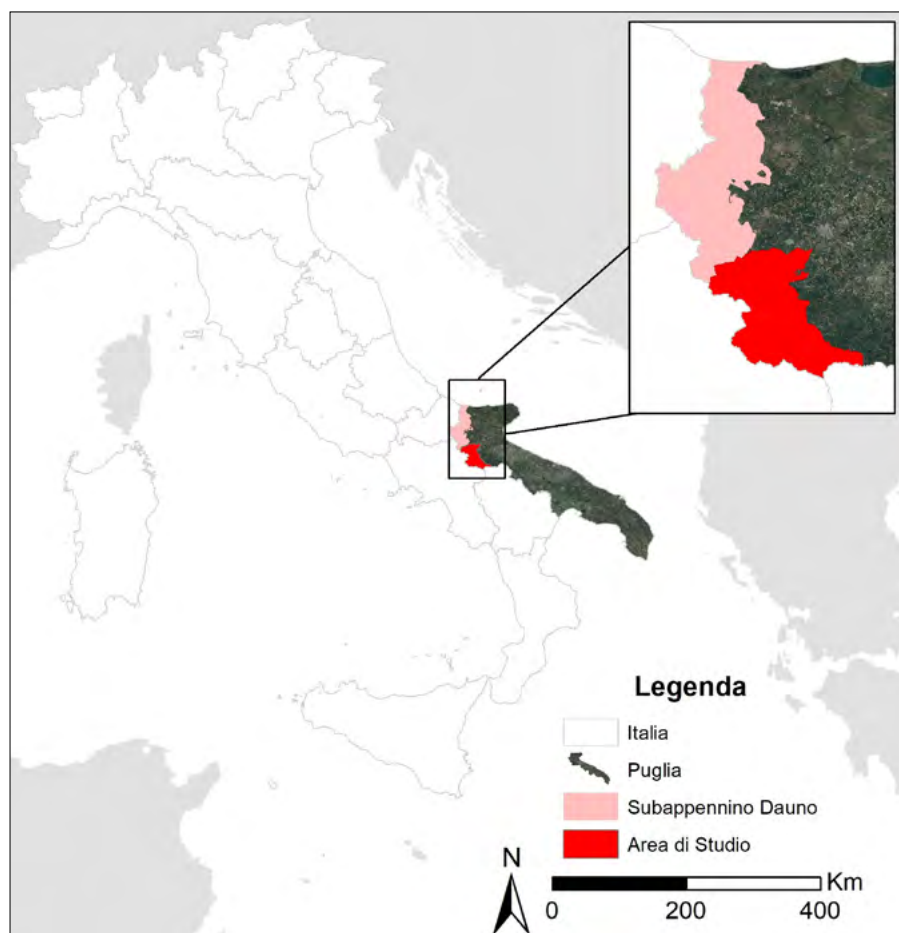


Figura 1. Inquadramento del Subappennino Dauno (Puglia, Italia Meridionale) e dell'area di studio

Infatti, l'alternanza di strati rocciosi fratturati e argille fessurate è una caratteristica comune dei versanti situati nell'area della Daunia, determinata dalle intense azioni tettoniche avvenute durante l'orogenesi appenninica (Cotecchia *et al.*, 2015). L'unità Daunia è costituita da una successione oligocenica-miocenica di strati argillosi e calcarei (Formazioni del Flysch Rosso e del Flysch Numidico), da una successione torbidity calcareo-marnosa (Formazione del Flysch di Faeto) e da una formazione argillosa e marnoso-argillosa (Formazione di Toppo Capuana). L'Unità Fortore è costituita dalle Formazioni Flysch Rosso e Flysch Numidico, sovrapposte a depositi terrigeni miocenici pseudo-trasgressivi (Formazioni Flysch San Bartolomeo e Argille Marnose di Toppo Capuana) (Dazzaro e Rapisaldi, 1996; Patacca e Scandone, 2007). La fessurazione e le scarse proprietà di resistenza della matrice argillosa governano il comportamento meccanico del terreno. Di conseguenza, il paesaggio è caratterizzato principalmente da pendii argillosi con pendenze medie di circa 12° che, localmente, aumentano fino a 45° in presenza di strati rocciosi (Pellicani *et al.*, 2014).

Il Subappennino Dauno è storicamente e cronicamente caratterizzato da numerose e varie forme di dissesto, in particolare frane indotte da terremoti e

da piogge (Catenacci, 1992, Pellicani e Spilotro, 2013). Tra le principali cause predisponenti e scatenanti, vi sono aspetti lito-stratigrafici, morfo-idrologici, vegetativi, climatici ed antropici. L'evoluzione geomorfologica del paesaggio di quest'area è associata all'occorrenza di frane di varie dimensioni favorite dalla litologia, dalla ripidità dei versanti, dall'insufficiente copertura arborea, dall'attività sismica e dalle condizioni climatiche (AdB-Puglia, 2004; Provincia di Foggia, 2009). Pur essendo principalmente espressione delle dinamiche naturali del territorio, esse costituiscono una minaccia alla sua integrità e fruibilità, nonché un ostacolo allo sviluppo socioeconomico della popolazione autoctona (Regione Puglia, 2015). Inoltre, la rapida espansione delle aree edificate nelle zone instabili degli ultimi decenni e attività antropiche come la deforestazione e lo scavo di pendii hanno contribuito ad esacerbare l'innescio di processi franosi.

Per quanto riguarda le loro conseguenze, le frane del Subappennino Dauno sono tra le principali fonti di danni alle aree urbane e alle infrastrutture (Provincia di Foggia, 2009). Al fine di ridurre il loro impatto, diverse opere di difesa del suolo sono state finanziate in questo territorio. Secondo il catalogo ReNDiS dell'ISPRA (Repertorio Na-

Tabella 1. Comuni della Daunia (Puglia, Italia meridionale)

Comuni	Area (kmq)	Abitanti (ISTAT 2022)	Densità abitativa (ab/kmq)
Accadia	30,5	2.182	72
Alberona	49,4	849	17
Anzano di Puglia	10,9	1.103	101
Biccari	106,5	2.640	25
Bovino	84,2	2.998	36
Candela	97,4	2.540	26
Carlantino	34,4	826	24
Casalnuovo Monterotaro	48,3	1.379	29
Casalvecchio di Puglia	31,7	1.704	54
Castelluccio Valmaggiore	26,6	1.226	46
Castelnuovo della Daunia	61,6	1.292	21
Celenza Valfortore	64,6	1.403	22
Celle di San Vito	18,4	147	8
Chieuti	61,3	1.563	26
Deliceto	76,0	3.563	47
Faeto	26,1	606	23
Monteleone di Puglia	36,8	959	26
Motta Montecorvino	20,3	655	32
Orsara di Puglia	83,7	2.521	30
Panni	32,6	714	22
Pietramontecorvino	72,3	2.511	35
Rocchetta Sant'Antonio	72,5	1.683	23
Roseto Valfortore	49,9	986	20
San Marco la Catola	28,7	890	31
San Paolo di Civitate	91,0	5.563	61
Sant'Agata di Puglia	116,2	1.831	16
Serracapriola	144,2	3.704	26
Torremaggiore	210,1	16.567	79
Troia	168,1	6.771	40
Volturara Appula	52,2	391	7
Volturino	58,2	1.554	27

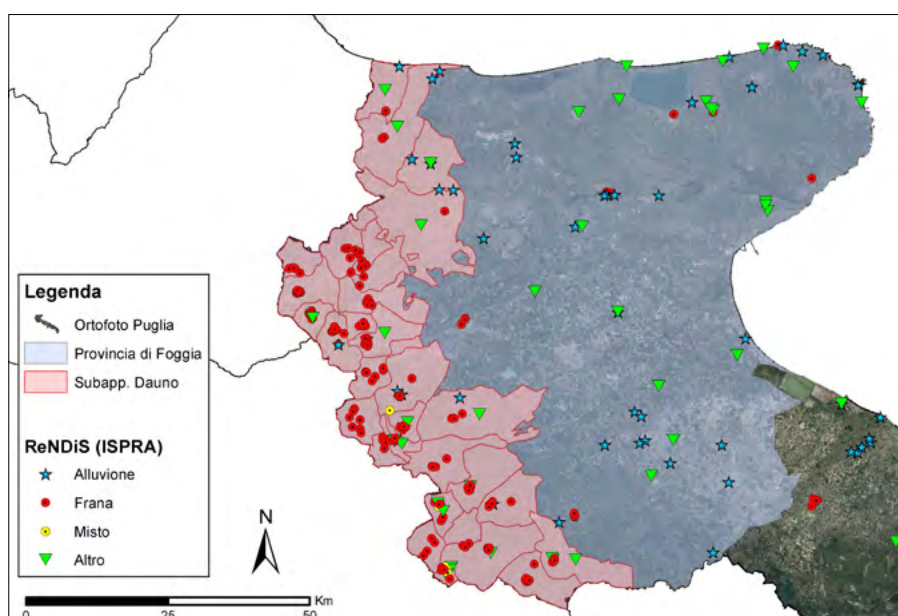


Figura 2. Ubicazione delle misure di mitigazione nell'area della Daunia (dati ReNDiS aggiornati al 2022)

zionale degli interventi per la Difesa del Suolo), dal 1999 al 2022 nella regione Puglia sono stati finanziati 470 progetti corrispondenti a € 382.477.892 (Fig. 2). Essi hanno riguardato soprattutto la mitigazione delle alluvioni (148 progetti, corrispondenti a € 196.191.087) e delle frane (198 progetti, corrispondenti a € 250.782.675). Per quanto riguarda la mitigazione del rischio dovuto a fenomeni franosi, la provincia di Foggia risulta la più finanziata con 178 progetti (corrispondenti a € 217.879.040), di cui 162 finanziati nell'area della Daunia (corrispondenti a € 188.971.994), con un costo annuo degli interventi di mitigazione normalizzato per area pari a 39,80 €/ha x anno), circa sette volte superiore al valore della regione Puglia, corrispondente a 5,58 €/ha x anno) (Fig. 3).

2.2 I FENOMENI FRANOSI DEL SUBAPPENNINO DAUNO CENSITI NEI CATALOGHI UFFICIALI

Esistono diversi database che presentano informazioni relative a fenomeni franosi per l'area considerata. A livello nazionale, il catalogo AVI, acronimo di Aree Vulnerate Italiane, è stato il primo database completo delle aree storicamente colpite da frane e alluvioni in Italia dal 1918 al 1998, costruito raccogliendo informazioni giornalistiche (Guzzetti *et al.*, 1994). L'attuale banca dati nazionale ufficiale che raccoglie informazioni aggiornate sulle frane in Italia è il catalogo IF-FI, acronimo di Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, che conta più di 620.000 frane su tutto il territorio nazionale.

Per i 31 comuni della Daunia, il catalogo AVI presenta 224 frane registrate in circa 65 anni (1931-1995), che corrispondono al 75% delle frane registrate nella provincia di Foggia secondo lo stesso catalogo. I fattori scatenanti non sono stati sempre identificati. Solo 58 frane su 224 hanno questa informazione, identificando le precipitazioni come il principale fattore scatenante (67%), seguito da azioni antropiche (10%) e terremoti (5%). Tra le 224 frane della Daunia, 154 frane hanno informazioni spaziali, mentre 91 eventi hanno informazioni temporali, di cui 31 con informazioni sulla data precisa di accadimento. Le frane con informazioni sia spaziali che temporali sono 74, di cui 19 con il giorno di accadimento (Tab. 2).

Per quanto riguarda l'inventario IF-FI, che include informazioni raccolte da progetti precedenti e altri dati provenienti da fotointerpretazioni, riviste e rapporti tecnici, l'area della Daunia conta 542 movimenti di massa corri-

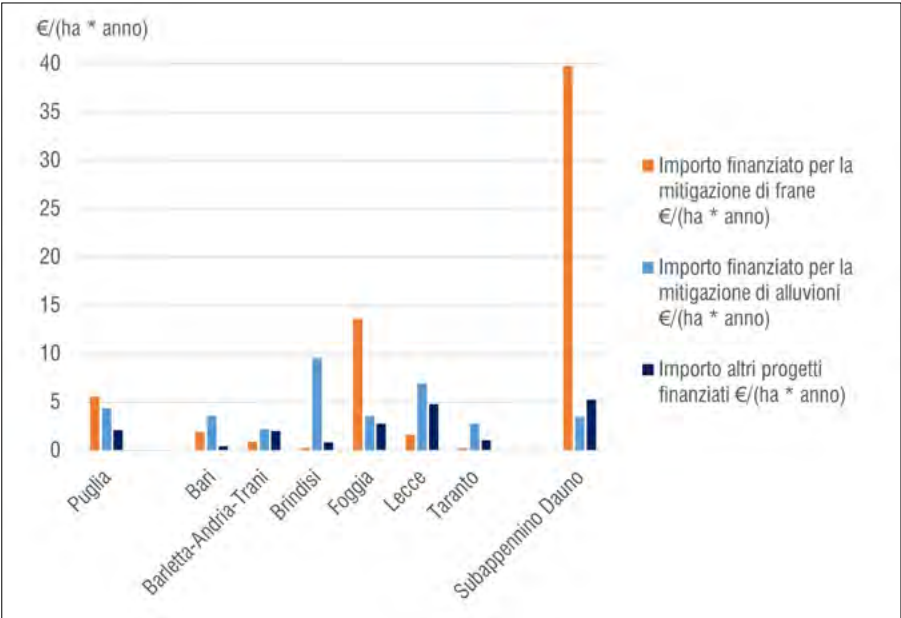


Figura 3. Costo annuale normalizzato dei progetti di mitigazione per unità territoriale (dati ReNDiS aggiornati al 2022)

spondenti all’80% dei fenomeni franosi della provincia di Foggia inventariati nello stesso catalogo. Più della metà dei movimenti di massa ha informazioni sulle misure di mitigazione e sulle aree coinvolte, mentre quasi tutte le frane hanno informazioni sul tipo di movimento, attività franosa, geologia, fattori predisponenti e scatenanti e sulle conseguenze. Tuttavia, nessuna frana presenta informazioni relative alla data di occorrenza dei fenomeni franosi.

Data l’importanza della problematica per l’area investigata, diversi studi sono stati condotti a scala locale. Ad esempio, nel 2009 l’Autorità di Bacino Puglia ha prodotto un inventario delle frane utilizzando l’aerofotointerpretazione stereoscopica di fotografie aeree a scala 1:33.000, volate nel 2003 dall’Istituto Geografico Militare (Pellicani *et al.*, 2014). Esso raccoglie circa 1.330 frane con informazioni spaziali, classificando i movimenti di massa avvenuti. Tuttavia,

la carta dell’inventario non contiene informazioni sull’attività della frana e sulla data di accadimento poiché le frane non sono state rilevate in anni diversi.

Un’altra banca dati sulle frane è stata sviluppata nell’ambito del progetto “Soglie pluviometriche”, ovvero “Rainfall Thresholds”, dall’ Istituto di ricerca per la protezione idrogeologica del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-IRPI) in collaborazione con la Protezione Civile della Regione Puglia (Loiacono *et al.* 2014). Il database delle frane è stato creato con l’obiettivo di definire una soglia di pioggia empirica per il territorio del Subappennino Dauno che riguardasse la potenziale inizializzazione di frane superficiali originate da piogge. I dati spaziali e temporali e i fattori scatenanti delle frane passate sono stati raccolti principalmente dai giornali, dai rapporti locali e dai database precedenti (Parise *et al.*, 2015). Di conseguenza, gli eventi di frana registrati presentano informazioni spaziali e temporali accurate sulle frane innescate dalle piogge per il periodo esaminato (1950-2014). Tuttavia, poiché lo studio ha riguardato solo frane superficiali e di primo innesco, questo database considera solo una parte degli eventi franosi complessivi, contando poco meno di cento eventi franosi verificatesi nell’area del Subappennino Dauno nel periodo considerato.

Tabella 2. Frane con informazioni spaziali e temporali (data esatta di occorrenza) presenti nell’inventario AVI per l’area della Daunia

N.	Comune	Data di occorrenza	Numero identificativo	Fattore scatenante	N (UTM)	E (UTM)	Tipologia di cinematismo
1	San Marco La Catola	24/02/1931	4597655	Piogge	4597655	500534	/
2	Alberona	14/12/1933	4587022	Piogge	4587022	510289	Complesso
3	Alberona	24/02/1934	4587022	Piogge	4587022	510289	/
4	Sant’Agata di Puglia	03/04/1935	4556154	/	4556154	531846	/
5	Volturara Appula	12/01/1953	4594430	Piogge	4594430	504912	Complesso
6	Castelnuovo della Daunia	28/01/1955	4602798	Piogge	4602798	509528	/
7	Troia	21/01/1957	4579344	Piogge	4579344	526377	/
8	Faeto	19/01/1963	4575708	Piogge	4575708	513518	/
9	Celenza Valfortore	22/02/1963	4597150	Piogge	4597150	495428	/
10	Bovino	17/09/1966	4571210	Piogge	4571210	534838	Earthflow
11	Celenza Valfortore	27/07/1976	4601302	Piogge	4601302	498101	/
12	Troia	29/12/1976	4576904	Piogge	4576904	523350	/
13	Deliceto	04/01/1977	4560912	Piogge	4560912	531863	/
14	Sant’Agata di Puglia	09/01/1977	4560198	Piogge	4560198	531488	/
15	Celenza Valfortore	27/01/1977	4601081	Piogge	4601081	498481	/
16	Sant’Agata di Puglia	26/02/1979	4555892	Piogge	4555892	532131	/
17	Monteleone di Puglia	01/03/1979	4555077	Piogge	4555077	522506	/
18	Biccari	14/02/1994	4587197	Piogge	4587197	517450	/
19	San Paolo di Civitate	24/08/1995	4625316	Piogge	4625316	518832	/

3. RISULTATI E DISCUSSIONI

Stanti le scarse informazioni complete di aspetti spazio-temporali relativi ad eventi franosi occorsi nel territorio in esame, si è pertanto proceduto alla costruzione di un inventario multi-temporale di frane. Esso è stato ottenuto

dall'analisi testuale dei documenti raccolti nell'archivio dell'ufficio regionale "Difesa del Suolo" della Regione Puglia, il quale è coinvolto nella pianificazione degli interventi strutturali di mitigazione del rischio nel campo della difesa del suolo a livello regionale. I risultati di questo lavoro riguardano la porzione

meridionale del Subappennino Dauno (Fig. 1). Per i comuni indagati, l'ufficio amministrativo regionale ha raccolto 212 documenti cartacei che riguardano movimenti di massa avvenuti tra febbraio 1998 e dicembre 2018. Pertanto, l'intervallo di tempo di registrazione del database è di 21 anni.

I 212 documenti cartacei analizzati possono essere suddivisi come di seguito:

- comunicazioni dai comuni (121), che sono principalmente comunicazioni sul verificarsi di movimenti franosi all'interno delle rispettive aree amministrative, e richieste di finanziamenti per affrontare le fasi di emergenza;
- sopralluoghi (68) svolti dagli uffici tecnici locali (27), dall'Autorità di Bacino competente (2), dagli uffici tecnici regionali (34) e da altre istituzioni (5);
- altri documenti (23), come comunicazioni inviate dal Prefetto della provincia di Foggia all'ufficio amministrativo Difesa del Suolo, e atti legali.

Dall'analisi dei documenti cartacei relativi all'area di studio, sono stati censiti 562 eventi franosi occorsi nel periodo 1998-2018. Tra questi, 493 eventi hanno informazioni spazio-temporali complete, i quali hanno interessato 236 frane presenti sul territorio (Tab. 3 e Fig. 4).

Comuni Subappennino Dauno (Area meridionale)	Inventario degli eventi franosi censiti (periodo 1998-2018)		
	Numero di eventi franosi totale	Numero di eventi franosi con informazioni spazio-temporali complete	Numero di frane censite
Accadia	21	17	16
Anzano di Puglia	37	34	18
Bovino	36	23	12
Candela	12	10	8
Castelluccio Valmaggiore	37	35	23
Celle di San Vito	19	14	8
Deliceto	26	21	16
Faeto	8	6	6
Monteleone di Puglia	42	37	18
Orsara di Puglia	23	19	14
Panni	53	48	20
Rocchetta Sant'Antonio	145	144	36
Sant'Agata di Puglia	101	83	39
Troia	2	2	2
Totale	562	493	236

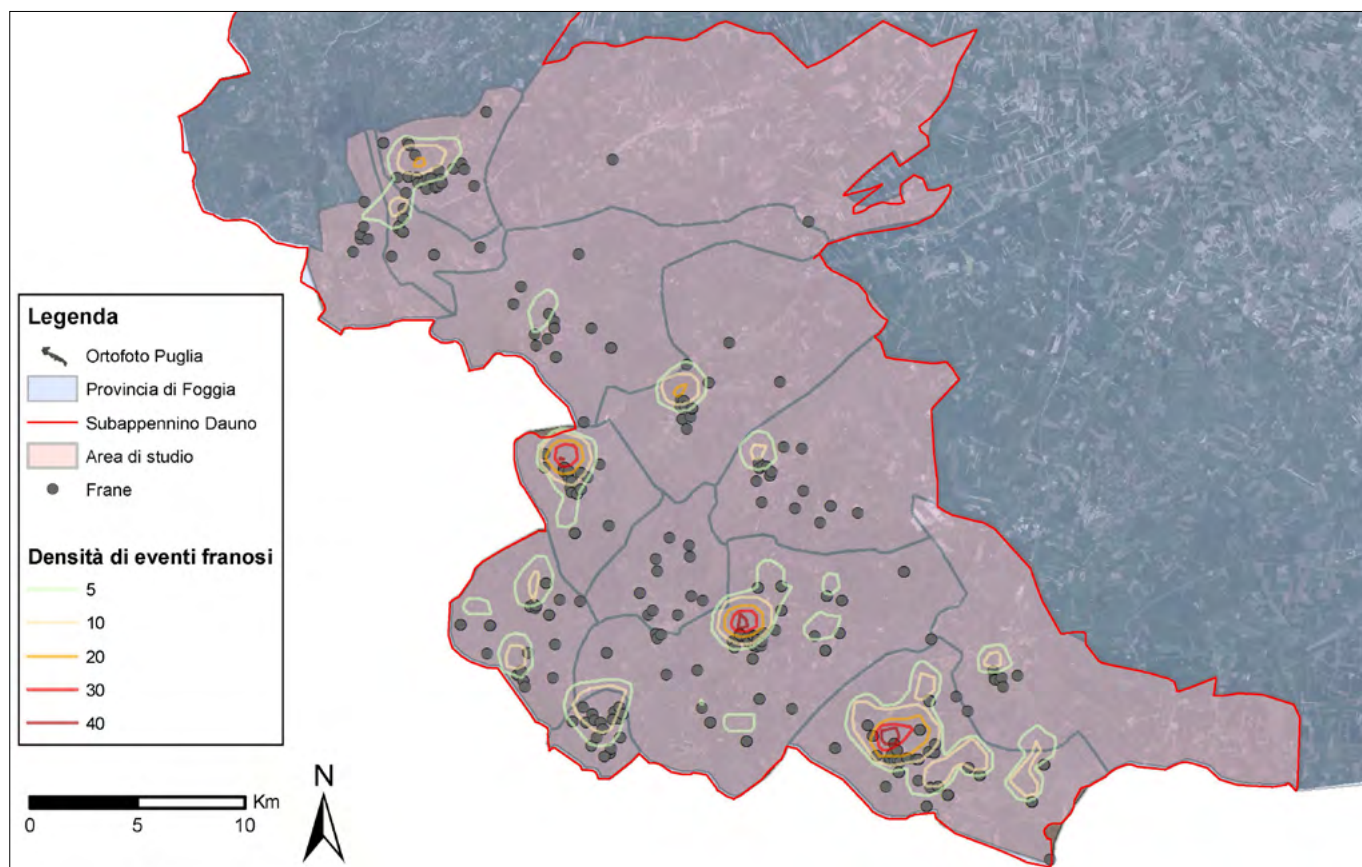


Figura 4. Eventi franosi censiti nel periodo 1998-2018 nella parte meridionale del Subappennino Dauno



Figura 5. Esempio di frana ad elevata accuratezza spaziale e temporale avvenuta nel comune di Panni in data 7 marzo 2009

Poiché la maggior parte dei documenti analizzati riguarda comunicazioni tempestive da parte dei comuni, il 92% degli eventi di frana complessivi (454) presenta elevata accuratezza temporale (info giornaliera).

Per quanto riguarda l'accuratezza spaziale, è stata necessaria un'interpretazione delle descrizioni presenti nei documenti cartacei al fine di estrarre informazioni sulla localizzazione degli eventi franosi. Dato che il focus di questi documenti era spesso relativo ai danni e alla richiesta di fondi per affrontare la fase di emergenza, spesso le descrizioni riportano solo una breve descrizione dei luoghi impattati, raramente

associata a informazioni accurate come, ad esempio, coordinate geografiche. In particolare, nel caso di eventi franosi verificatisi in zone non abitate con un impatto sulle strade locali, le descrizioni riportate risultavano appena sufficienti per la localizzazione all'interno dell'area interessata, in termini ampi e non specifici, utilizzando la Carta Tecnica Regionale.

Al fine migliorare l'accuratezza spaziale e localizzare gli eventi franosi occorsi, si è proceduto ad un ulteriore processing attraverso l'impiego di immagini satellitari. Laddove possibile, il confronto di immagini satellitari multi-temporali fornite da Google Earth ha

permesso di ricavare informazioni spaziali degli eventi verificatisi con un'elevata precisione. A titolo di esempio, la figura 5 mostra l'evento franoso registrato il 7 marzo 2009 nel comune di Panni. L'evento è stato descritto come segue: "A seguito delle precipitazioni dei giorni precedenti, una frana si è abbattuta nella zona rurale di Alvanello sulla strada comunale Bosco-Cotizzi. Il coronamento di frana interessa un'azienda agricola e la strada provinciale n. 138".

In definitiva, il 34% (166 eventi franosi) è risultato con un'elevata accuratezza spaziale (ubicazione esatta) mentre il resto degli eventi (327) presentano informazioni circa la località colpita e



Figura 6. Impatti delle frane sulle strade provinciali e comunali del territorio investigato (fonte: report di sopralluoghi forniti dalla Sezione Difesa del Suolo e Rischio Sismico, Regione Puglia)

necessiterebbero di un ulteriore processing, ad esempio incrociando le informazioni raccolte con i database esistenti e/o coinvolgendo i comuni coinvolti, al fine di migliorare l'accuratezza spaziale degli eventi censiti.

Per quanto riguarda i fattori scatenanti, sono stati chiaramente identificati per quasi tutti gli eventi franosi in base alla descrizione e agli allegati disponibili. Di conseguenza, in riferimento agli eventi di frana complessivamente identificati (562) verificatisi nel periodo indagato 1998-2018, circa il 95% degli eventi di frana (532) è stato associato al verificarsi di eventi di pioggia.

Con riferimento all'identificazione della tipologia di frana, la maggior parte delle frane censite è risultata earthflow (58%) e a cinematisma complesso (13%). Esse hanno provocato danni principalmente a strade municipali (266 eventi), e strade provinciali e/o nazionali (75) (Fig. 6). Altri impatti sono stati registrati su edifici (36), e su reti locali idriche e fognarie (12) (Parisi, 2020).

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Tale contributo ha avuto come obiettivo quello di arricchire le informazioni spazio-temporali riguardanti eventi franosi occorsi all'interno del Subappennino Dauno. Dall'analisi dei database esistenti, gli inventari disponibili a scala nazionale e locale riportano scarse informazioni sulla data di accadimento degli eventi franosi. Pertanto, i dati disponibili risultano incompleti per la corretta elaborazione e mappatura del rischio da frana.

Al fine di arricchire i database esistenti delle informazioni temporali, il presente lavoro descrive una nuova catalogazione di dati di frana effettuata a partire da documenti cartacei raccolti nel corso degli ultimi decenni dall'ufficio regionale "Difesa del Suolo" della Regione Puglia. Il database ottenuto raccoglie 493 eventi di frana verificatisi all'interno dei 14 comuni indagati nel periodo 1998-2018. Sebbene riguardi solo il periodo 1998-2018, il principale vantaggio del nuovo inventario multi-temporale riguarda la completezza degli eventi franosi registrati, anche i più piccoli, con informazioni sulla localizzazione, la data di accadimento e i danni subiti.

Tuttavia, come si evince dai dati relativi all'esatta ubicazione degli eventi franosi, si necessita di ulteriori approfondimenti e di un confronto con i database esistenti al fine ottenere un migliore

grado di accuratezza spaziale. Nonostante ciò, la completezza informativa circa le componenti spazio-temporali degli eventi franosi a scala regionale e circa gli effetti diretti ed a cascata ad essi associati soddisfa i requisiti per una completa valutazione della pericolosità e del rischio da frana, elemento essenziale per una corretta mitigazione del rischio e gestione del territorio.

RINGRAZIAMENTI

Un doveroso ringraziamento va ai dirigenti e funzionari afferenti alla sezione Difesa del Suolo e Rischio Sismico, nella figura del Dott. Gianluca Formisano, e al servizio Previsione e Prevenzione dei Rischi e Gestione Post Emergenza, in particolare l'Ing. Pierluigi Loiacono e l'Ing. Tiziana Bisantino, della Regione Puglia per l'accesso ai dati utilizzati nel presente lavoro.

BIBLIOGRAFIA

- ADB-PUGLIA (2004), *Piano di Bacino Stralcio Assetto Idrogeologico (PAI)*.
- ALEOTTI P., CHOWDHURY R. (1999), *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*. Bull. Eng. Geol. Environ. 58, 21–44. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>
- CATENACCI V. (1992), *Il dissesto geologico e geomorfologico in Italia dal dopoguerra al 1990*, Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia. Servizio Geologico Nazionale.
- COROMINAS J., VAN WESTEN C., FRATTINI P., CASCINI L., FOTOPOULOU S., CATANI F., VAN DEN EECKHAUT M., MAVROULI O., AGLIARDI F., PITILAKIS K., WINTER M.G., PASTOR M., FERLISI S., TOFANI V., SMITH J.T., HERVA J. (2014), *Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk*, 209–263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- COTECCHIA F., VITONE C., SANTALOAIA F., PEDONE G., BOTTIGLIERI O. (2015), *Slope instability processes in intensely fissured clays: case histories in the Southern Apennines*. Landslides 12, 877–893. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0516-7>
- CROSTA G., FRATTINI P., FUGAZZA F., CALUZZI L. (2005), *Cost-benefit analysis for debris avalanche risk management*, in: HUNGR, O., FELL, R., COUTURE, R., EBERHARDT, E. (Eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor & Francis Group, pp. 517–524.
- DAZZARO L., RAPISALDI L. (1996), *Schema geologico del margine appenninico tra il fiume Fortore e il fiume Ofanto*. Mem Soc Geol Ital 51, 143–147.
- FELL R., WHITT G., MINER T., FLENTJE P. (2008), *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning*. Eng. Geol. 102, 83–84. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.009>
- GUZZETTI F., CARDINALI M., REICHENBACH P. (1994), *The AVI project: A bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy*. Environ. Manage. 18, 623–633. <https://doi.org/10.1007/BF02400865>
- LOIACONO P., AMORUSO G., BRUNETTI M., DRAGONE V., GUZZETTI F., PARISE M., PERUCCACCI S., TRABACE M., VENNARI C., VESSIA G. (2014), *Soglie pluviometriche per l'insacco di fenomeni franosi alla scala nazionale e regionale: il caso del Sub-Appennino Dauno (Puglia settentrionale)*. Geologia dell'Ambiente, suppl. 2/2014, 147–150.
- PARISE M., PISANO L., VENNARI C., VESSIA G. (2015), *Relazione finale attività CNR IRPI – Servizio Protezione Civile Regione Puglia "Definizione di soglie pluviometriche"*.
- PARISI A. (2020), *Integrating temporal probability in landslide hazard evaluation towards the assessment of the economic risk at regional scale*. Tesi di Dottorato, Politecnico di Bari
- PATACCA E., SCANDONE P. (2007), *Geology of the Southern Apennines*. Boll Soc Geol It 75–119.
- PELLICANI R., SPILOTRO G. (2013), *Landslide susceptibility mapping in Apulian Apennine (Italy)*. Rend. on Line SGI, ISSN 2035–8008, 24, 238–240, Eds. Calcaterra & Fabbrocino
- PELLICANI R., VAN WESTEN C.J., SPILOTRO G. (2014), *Assessing landslide exposure in areas with limited landslide information*. Landslides 11, 463–480. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0386-4>
- PROVINCIA DI FOGGIA (2009), *Report of Territorial Coordination Plan of Foggia province*.
- REGIONE PUGLIA (2015), *Piano Paesaggistico e Territoriale Regionale*.
- UNISDR (2015), *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030, Third World Conference on Disaster Risk Reduction*. Sendai, Japan
- VAN DEN EECKHAUT M., HERVÁS J. (2012), *Landslide inventories in Europe and policy recommendations for their interoperability and harmonisation*. A JRC Contrib. to EU-FP7 Safel. Proj. Report EUR, 202. <https://doi.org/10.2788/75587>
- VAN WESTEN C.J., VAN ASCH T.W.J., SOETERS R. (2006), *Landslide hazard and risk zonation – Why is it still so difficult?* Bull. Eng. Geol. Environ. 65, 167–184. <https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0>
- VAN WESTEN C.J., CASTELLANOS E., KURIKOSSE S.L. (2008) *Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview*. Eng. Geol. 102, 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>
- VARNES D.J., IAEG-CLOMMS (1984), *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Paris: UNESCO

SITOGRAFIA

- CATALOGO ReNDIS – ISPRA: <http://www.rendis.isprambiente.it/rendisweb/>
- PROGETTO AVI: <http://avi.gndci.cnr.it/>
- PROGETTO IFFI: <https://www.progettoiffi.isprambiente.it/>

Resilienza in Irpinia. Analisi e bilancio nell'Alta Valle del Calore dopo il terremoto del 1980

Resilience in Irpinia. Analysis and assessment in the Upper Calore Valley after the 1980 earthquake

Parole chiave: Terremoto 1980; Irpinia; Resilienza
Key words: 1980 Earthquake; Irpinia; Resilience

Marco Pizza¹, Alessandro Maria Michetti^{1,3}, Maria Francesca Ferrario¹, Angelo Capone², Rosa Nappi³, Sabina Porfido^{3,4}

¹ Università degli Studi dell'Insubria, Como, Italy.

² Geologo, Montella (AV), Italy

³ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sez. Osservatorio Vesuviano, Napoli, Italy

⁴ CNR- ISA, Avellino, Italy

Email: m.pizza@uninsubria.it

INTRODUZIONE

Lo studio del rapporto tra uomo e natura è di fondamentale importanza, soprattutto quando quest'ultima decide di imporre in maniera inappellabile le proprie leggi. L'analisi dell'impatto dei forti terremoti sull'ambiente naturale e su quello antropico è cruciale in una Nazione come la nostra. L'Italia è un Paese a forte densità abitativa e con un patrimonio artistico, storico e culturale di inestimabile valore, ma anche fortemente vulnerabile dal punto di vista delle dinamiche dell'ambiente fisico.

Il 23 Novembre 1980 un forte terremoto colpì un'ampia area al confine

tra Campania e Basilicata; il sisma fu però avvertito in quasi tutta la Penisola italiana. L'area dei massimi effetti fu localizzata nelle alte valli dei fiumi Ofanto e Sele, tuttavia distruzioni gravi e diffuse si estesero a nord/nord-ovest fino alle alte valli dei fiumi Sabato e del Calore.

L'evento sismico fu caratterizzato da una Magnitudo $M_w = 6.9$ e da un'intensità epicentrale $I_0 = X$ MCS (Rovida *et al.*, 2022), risultando essere ad oggi il sisma a più elevata energia avvenuto in Italia negli ultimi cento anni. Il terremoto provocò danneggiamenti in circa 800 località; furono distrutte complessivamente 77.342 abitazioni (4% del

patrimonio edilizio totale di Campania e Basilicata), 275.263 (15%) furono gravemente danneggiate e 479.973 (26%) furono lievemente danneggiate. Le vittime furono 2.914, i feriti 8.848 e gli sfollati circa 280.000 (Postpischl *et al.*, 1985).

Il terremoto del 1980 provocò anche numerosi effetti sull'ambiente naturale, sia primari, come fagliazione superficiale, sia secondari, come fenomeni gravitativi (oltre 200 frane sismoindotte), fratture nel suolo, 21 casi di liquefazione e numerose variazioni idrologiche relative alla portata delle sorgenti e dei fiumi (Porfido *et al.*, 2007). L'intensità epi-

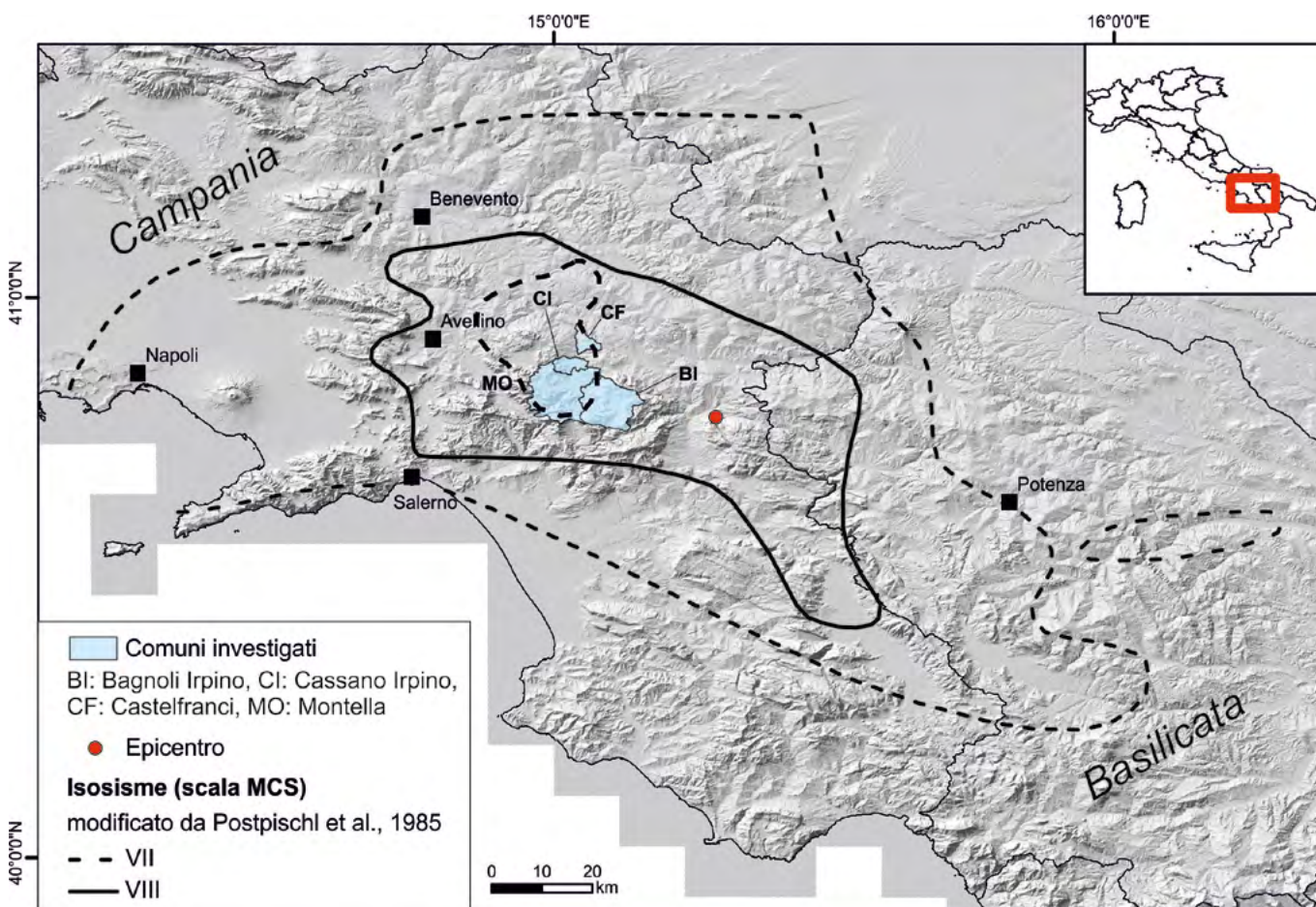


Figura 1. Mappa delle isosiste del terremoto Irpino-Lucano del 1980, modificato da Postpischl *et al.* (1985)

centrale, stimata con la scala ESI-2007 (Michetti *et al.*, 2007) risulta essere pari al X grado.

La vocazione del territorio irpino alla forte sismicità è ben documentata dai dati storici, archeologici e geologici. La stessa area colpita dall'evento del 1980 fu interessata da forti terremoti storici, quali gli eventi del 1456 ($M_w = 7.19$, $I_0 = XI$), 1466 ($M_w = 5.98$, $I_0 = VIII-IX$), 1517 ($M_w = 5.3$, $I_0 = VII-VIII$), 1732 ($M_w = 6.75$, $I_0 = X-XI$), 1910 ($M_w = 5.76$, $I_0 = VIII$), 1930 ($M_w = 6.67$, $I_0 = X$), 1962 ($M_w = 6.1$, $I_0 = IX$), e il terremoto del 1694 ($M_w = 6.73$, $I_0 = X$), considerato quasi un "gemello" del terremoto del 1980 (Serva, 1985; Galli *et al.*, 2006). Le analisi paleosismiche condotte nell'area epicentrale hanno evidenziato il ripetersi regolare di forti terremoti anche nel passato preistorico (Pantosti *et al.*, 1989; Blumetti *et al.*, 2002; Galli and Peronace 2014; Galli 2020; Sgambato *et al.*, 2020).

AREA DI STUDIO

In questa ricerca, viene riportata l'analisi dettagliata degli effetti sismodinodotti, sull'ambiente e sul contesto antropico, e del "percorso di resilienza", durato oltre quarant'anni, di quattro comuni della provincia di Avellino: Bagnoli Irpino, Cassano Irpino, Castelfranci e Montella che sono situati lungo le rive del Fiume Calore Irpino e posti nell'area del *far field*, a circa 25 km dall'epicentro.

I comuni compresi nell'area di studio subirono un danneggiamento al patrimonio edilizio valutato con un'intensità compresa tra il VII e l'VIII grado MCS (Fig.1), ossia un livello di danneggiamento molto diffuso, con pochi crolli totali o parziali (Fig. 2).

Le unità edilizie dei quattro comuni distrutte o danneggiate furono complessivamente 4.755, le persone rimaste senza tetto furono 1.951 (11,9%), 16 le vittime (0,1%) e 320 feriti (2%) su un totale di 16.370 abitanti (Proietti, 1985-89).

Il danneggiamento in nessuno dei quattro paesi fu omogeneo: alcune parti degli abitati furono maggiormente danneggiate rispetto alle aree contigue. Infatti, a parità di tipologie costruttive, le aree più danneggiate furono quelle maggiormente suscettibili a fenomeni di locale amplificazione sismica, come evidenziato da successive indagini geologiche effettuate dopo il sisma (Fig. 2).

Il terremoto causò danni importanti al patrimonio storico e culturale dei quattro paesi, infatti furono danneggiati numerosi edifici storici e di grande importanza per le comunità.



Figura 2. Danneggiamenti provocati dal sisma nell'Alta Valle del Calore. Foto: Via D'Aulisia di Bagnoli Irpino (T. Aulisa); Palazzo Baronale di Cassano Irpino (Arch. Fam. Pizza); Chiesa di S. Nicola di Castelfranci (Arch. A. Di Napoli); Via del Corso di Montella (<https://www.montella.eu>)

Nell'area dell'Alta Valle del Calore furono rilevati anche numerosi effetti cosismici sull'ambiente naturale, quali fratture nel terreno, fenomeni gravitativi (i più importanti registrati nei pressi dell'abitato di Castelfranci), liquefazioni (Piana del Laceno) e variazioni idrologiche, soprattutto nel complesso sorgentizio di Cassano Irpino (Porfido *et al.*, 2007; Pizza, 2021).

RESILIENZA E RICOSTRUZIONE

La resilienza, dal latino "resilire" ossia tornare alle origini, è la capacità di raggiungere un adattamento positivo a fronte di eventi significativamente stressanti e traumatici, come di fatto fu il terremoto del 1980 (Porfido *et al.*, 2022). Una definizione di resilienza applicata a processi naturali, come i terremoti, è fornita da Bruneau *et al.* (2003): "La capacità delle unità sociali di mitigare i pericoli, contenere gli effetti dei disastri quando accadono e attuare attività di recupero in modo da ridurre al minimo i disagi sociali e mitigare gli effetti di futuri terremoti".

Per sviluppare il tema relativo al "percorso di resilienza", si è valutata la risposta della popolazione e delle istituzioni dei comuni di Bagnoli Irpino, Cassano Irpino, Castelfranci e Montella "all'evento traumatico" rappresentato dal sisma del 1980.

Per analizzare la "risposta resiliente" di queste comunità, da una parte sono state raccolte preziose quanto varieghe testimonianze della popolazione locale, dall'altra si è tracciato il percorso intrapreso da istituzioni e cittadini, al fine del ripristino delle comunità stesse.

Sul tema "terremoto-resilienza" sono state raccolte complessivamente 40 interviste (Fig. 3), di cui l'85% con una fascia di età compresa tra i 60 e i 96 anni (2022), ossia le generazioni che hanno vissuto in maniera consapevole il terremoto e la successiva "fase di resilienza e ricostruzione". Dei 40 intervistati l'85% fu testimone diretto dell'evento sismico, mentre il 90% visse direttamente la successiva "fase dell'emergenza", ossia il periodo di circa un anno in cui furono forniti alla popolazione i primi ricoveri temporanei.

Analizzando proprio la "fase dell'emergenza", si può osservare una similitudine metodologica di approccio al problema di fornire ricoveri temporanei alla popolazione e una contemporaneità di intervento, almeno in questa fase, da parte delle amministrazioni dei comuni analizzati. Si può quindi tracciare un percorso degli interventi posti in essere (Fig. 4): innanzitutto furono montate le tende, giunte a fine novembre 1980, in seguito furono dislocate le roulotte (dicembre 1980), successivamente i container (giugno 1981), e infine, furono installati i prefabbricati (fine 1981) che hanno svolto la loro funzione di ricovero per la popolazione, raggiungendo, in alcuni casi, un lasso temporale di 20 anni.

Analizzare la tematica della ricostruzione post terremoto è particolarmente complesso data la vastità dell'area interessata e considerato il livello di danneggiamento. Non è scopo di questo studio indagare sulla bontà degli interventi eseguiti, ma l'obiettivo è quello di analizzare, mediante docu-

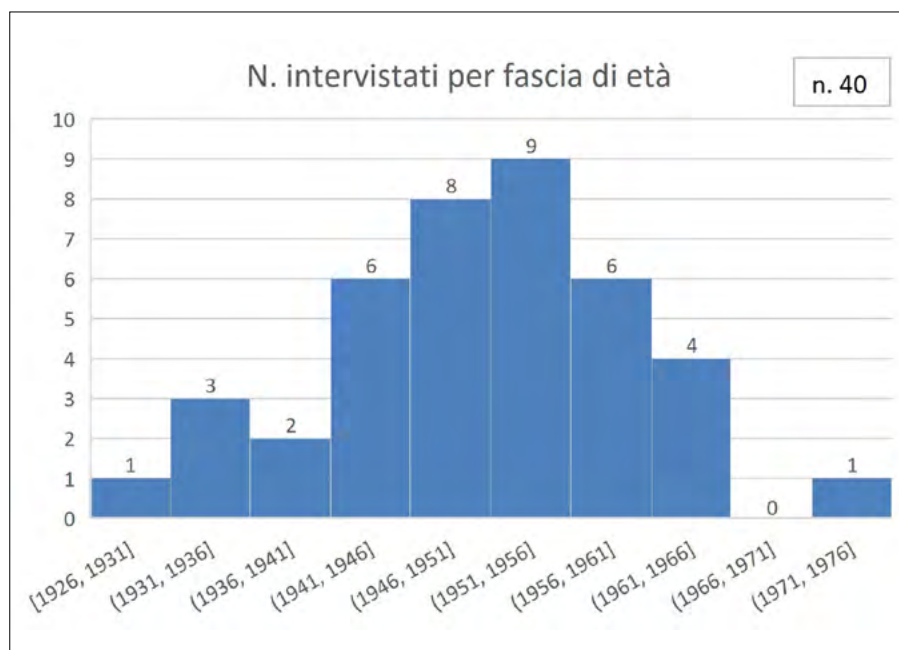


Figura 3. Istogramma che evidenzia il numero di testimonianze raccolte in relazione all'anno di nascita delle persone intervistate

Fase dell'emergenza

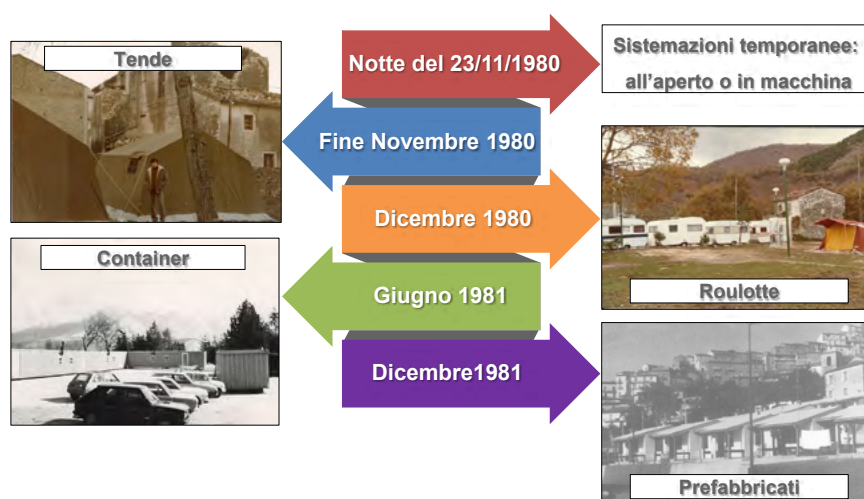


Figura 4. Cronologia degli interventi realizzati durante la fase dell'emergenza post terremoto

menti e testimonianze di chi ha vissuto questa fase, gli interventi effettuati e tracciare il cronoprogramma del recupero dei paesi di Bagnoli Irpino, Cassano Irpino, Castelfranci e Montella (Fig. 5). Pertanto per "ricostruzione" non si intende solamente quella fase che ha visto la riedificazione di edifici gravemente danneggiati dal terremoto del 1980, ma questo termine assume anche il significato di "ripristino" dei paesi danneggiati e di "ricostituzione" delle comunità che vi abitano.

Le normative di riferimento per il processo di ricostruzione furono, dapprima l'Ordinanza n. 80 del 6 gennaio 1981 del Commissario Straordinario di Governo, che consentì i primi interventi a fabbricati non gravemente danneggiati ed entro il limite di £. 10.000.000, e

poi la Legge n. 219 del 14 maggio 1981, legge quadro dell'intera attività di ricostruzione e di sostegno delle zone colpite dal sisma.

Grande attenzione fu riservata alla pianificazione territoriale, Cassano Irpino e Castelfranci usufruirono delle microzonazioni sismiche preliminari del Progetto Finalizzato Geodinamica del C.N.R. (AAVV, 1983).

Nel periodo tra il 1981 e il 1984 i comuni si dotarono del "Piano di Recupero", che risultava essere il primo strumento urbanistico comunale per la maggior parte dei comuni, eccetto che per Montella, in cui già prima del sisma era in vigore il "Piano di Fabbricazione". Proprio a Montella, il "Piano di Recupero" venne suddiviso in piani zonali ("Casali Bassi", "Casali Alti" e "Case

Sparsa"), riuniti nel 1991 nel "Piano di Recupero Generale".

Nel 1983-84, in contemporanea, nei quattro paesi partirono i primi interventi di ricostruzione edilizia, con il comune approccio metodologico volto a recuperare i centri abitati esistenti e non, come scelto altrove, alla delocalizzazione in nuovi insediamenti.

Nei comuni di Cassano Irpino e Castelfranci, considerata anche l'impossibilità di espandere i vecchi centri abitati, costruiti su piccoli rilievi calcarei dominanti la Valle del Calore, vennero realizzati dei nuovi insediamenti, i "Piani di Zona".

In questi insediamenti è stata trasferita permanentemente, negli anni seguenti, una fetta importante di popolazione. I Piani di Zona, generalmente costruiti in adiacenza ai centri abitati storici, da un lato hanno fornito alla popolazione delle abitazioni moderne e funzionali, dall'altro è impressione comune di buona parte dei residenti che queste aree risultino essere fisicamente e concettualmente distanti dai "paesi storici".

Tra il 1984 e il 1988 i comuni si dotarono di uno strumento urbanistico nuovo, il Piano Regolatore Generale, che se per Castelfranci è ancora in vigore, per gli altri comuni rimase come riferimento per oltre 20 anni.

Considerata l'instabilità del territorio su cui sorge l'abitato di Castelfranci, a forte rischio frane, si ritenne inoltre opportuno realizzare i Piani di risanamento (1986) e di consolidamento (1997) idrogeologico.

Infine, nella seconda metà degli anni 2010 fu adottato il Piano Urbanistico Comunale, attuale strumento di pianificazione territoriale, adottato in via definitiva o preliminare a Montella, Bagnoli Irpino e Cassano Irpino (2017-2021), mentre nel 2021 è iniziato l'iter per l'approvazione a Castelfranci.

Ad oggi, la ricostruzione dei comuni di Bagnoli Irpino, Cassano Irpino, Castelfranci e Montella si può considerare pressoché completa (>90%), con la maggior parte degli interventi di recupero e ricostruzione conclusi entro gli anni 2000 (Fig. 7). Tuttavia, il patrimonio edilizio costruito risulta essere oggi superiore alle reali necessità abitative. Infatti, la popolazione dell'area è di 13.147 abitanti (01/01/2022), il 20% in meno rispetto a quella del 1980. Questo dato dovrebbe essere letto sia in funzione del saldo naturale sia in relazione alle misure di incentivazione degli insediamenti industriali da installare nelle aree colpite

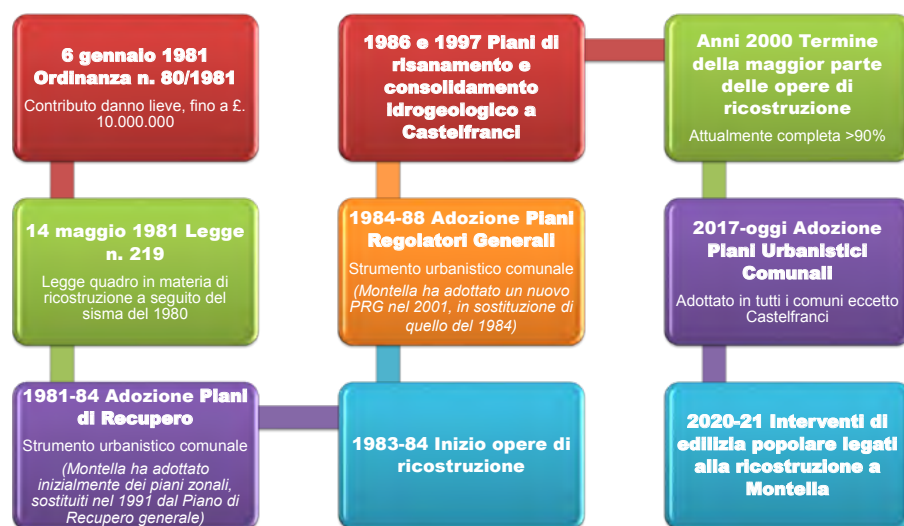


Figura 5. Cronologia degli interventi di pianificazione, recupero e ricostruzione

dal sisma e contenute nella Legge n. 219/1981 (Art. 32: “Aree da destinare agli impianti industriali”).

Per l'intero processo di ricostruzione delle aree terremotate dell'Irpinia e della Basilicata sono stati autorizzati stanziamenti, espressi in valori nominali del 2008, pari a circa 47,5 miliardi di euro (47.469,6 milioni di € a valori 2008; Camera dei Deputati, 2009).

Secondo la Commissione Parlamentare d'Inchiesta (1991), ultimo strumento in grado di discriminare le somme stanziati per ciascun paese, nei comuni analizzati, furono stanziati complessivamente € 53.227.278 (1981-87). Questa cifra è da considerarsi abbondantemente sottostimata, infatti, a titolo di esempio, per Castelfranci risultano stanziati € 15.164.151 a fronte di una spesa reale per la ricostruzione,

aggiornata al 2021, pari a € 64.244.914 (Tab. 1; Piza, 2021).

CONCLUSIONI

La tematica della “resilienza” ha avuto un ruolo centrale in questa ricerca; la capacità di riprendersi dopo un evento fortemente impattante è stata vissuta come un “percorso lungo 42 anni”: si è ricostruito l'impatto del terremoto sulle comunità e sulle singole persone che hanno deciso di dividerne il ricordo. Si è poi deciso di dare spazio a quella serie di interventi mirati alla gestione della fase dell'emergenza, al recupero e alla ricostruzione dei paesi, degli spazi comunitari, dei beni storici e architettonici e dell'equilibrio all'interno della comunità stessa.

Un processo, quello della ricostruzione, a ben vedere lungo, anche in

considerazione del livello di danneggiamento intermedio e valutato del VII-VIII MCS, complesso e articolato, conclusosi per la maggior parte nell'arco di più di un trentennio, ma che ancora non è completamente terminato.

Nonostante la storia sismica ben nota, il terremoto del 1980 ha evidenziato come il territorio non fosse ancora sufficientemente attrezzato a fronteggiare eventi catastrofici di tale portata. Un tipico esempio della “perdita della memoria storica” che caratterizza lo sviluppo urbanistico e territoriale del nostro Paese (e non solo) a partire dal secondo dopoguerra.

Da allora molto è cambiato, con la realizzazione di importanti studi pianificatori, l'adozione di nuovi piani urbanistici, nuove tecniche costruttive degli edifici, nuove attrezzature per fronteggiare le emergenze, maggiori conoscenze per la definizione del rischio sismico e l'istituzione della Protezione Civile (Fig. 6).

I dati raccolti possono fornire un contributo a una migliore comprensione del fenomeno sismico nella sua complessità, utile agli enti preposti e alla popolazione per una corretta valutazione della pericolosità ai fini della riduzione del rischio sismico locale. Inoltre, offrono uno spunto di riflessione per quella che potrebbe essere la programmazione futura per i centri antichi in zona sismica, in considerazione non solo di scenari che prevedono il riscontro degli effetti del terremoto nel contesto urbano ma anche sull'ambiente naturale. La dimostrata vulnerabilità agli effetti di un for-

Tabella 1: Tabella riassuntiva del danneggiamento e dei costi di ricostruzione per ciascun paese analizzato.

	Bagnoli Irpino	Cassano Irpino	Castelfranci	Montella
Intensità di sito (MCS)	VII VIII (Laceno)	VII-VIII	VII	VIII
Unità edilizie danneggiate	965	684	1.207	1.899
Morti	0	5 (0,5%)	1 (0,04%)	10 (0,1%)
Feriti	ND	11 (1,1%)	19 (0,7%)	290 (3,3%)
Persone rimaste senza tetto	465 (12%)	111 (11,5%)	184 (6,5%)	1.191 (13,5%)
Popolazione 1980	3.851 abitanti	983 abitanti	2.798 abitanti	8.738 abitanti
Popolazione attuale (1/1/2022)	3.029 abitanti	930 abitanti	1.821 abitanti	7.367 abitanti
Costi ricostruzione (1981-87) *	£.13.981.576.000 (€7.220.881,4 val. nom.)	£.12.046.058.000 (€6.221.269,8 val. nom.)	£.29.361.891.000 (€15.164.151,2 val. nom.) **	£.47.672.857.000 (€24.620.975,9 val. nom.)

Note:

* Dati da: COMMISSIONE PARLAMENTARE DI INCHIESTA SULLA ATTUAZIONE DEGLI INTERVENTI PER LA RICOSTRUZIONE E LO SVILUPPO DEI TERRITORI DELLA BASILICATA E DELLA CAMPANIA COLPITI DAI TERREMOTI DEL NOVEMBRE 1980 E FEBBRAIO 1981 (1991), ultimo strumento in grado di discriminare le somme stanziati per ciascun paese.

** I costi della ricostruzione aggiornati al 2021 ammontano a € 64.244.914 (Piza, 2021).



Figura 6. Panoramica attuale dei paesi di Bagnoli Irpino, Cassano Irpino, Castelfranci e Montella (Foto M. Pizzza).

te terremoto sull'ambiente naturale di questa area di studio, costituisce un elemento chiave per una corretta gestione e programmazione territoriale, in particolare nelle aree urbane. L'auspicio è che la memoria storica di quanto accaduto 42 anni fa possa servire ad arricchire e migliorare lo stato delle nostre conoscenze, assumendo maggiore consapevolezza per il futuro.

“La memoria è tesoro e custode di tutte le cose” Cicerone (I sec a.C.).

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (1983), *Indagini di microzonazione sismica – Intervento urgente in 39 centri abitati della Campania e Basilicata colpiti dal terremoto del 23 Novembre 1980*. CNR – Progetto Finalizzato Geodinamica. Consiglio Nazionale delle Ricerche, pubbl. n. 492.
- BLUMETTI A.M., ESPOSITO E., FERRELLI L., MICHETTI A.M., PORFIDO S., SERVA L., VITTORI E. (2003), *New data and reinterpretation on the November 23, 1980, M 6.9 Irpinia-Lucania earthquake (Southern Apennines) coseismic surface effects*. In: DRAMIS, F., FARABOLLINI, P., MOLIN, P. (Eds.), *Large scale vertical movements and related gravitational processes*. Study Geologici Camerti special issue, 2002, pp. 19-27.
- BRUNEAU M., et al. (2003), *A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities*. Earthquake Spectra, 19, 733–752.
- CAMERA DEI DEPUTATI - XVI LEGISLATURA - DOSSIER DI DOCUMENTAZIONE (2009), *I principali eventi sismici a partire dal 1968 – Normativa antisismica, finanziamenti, agevolazioni fiscali e contributive – Schede di lettura*. Documentazione e ricerche, Numero: 67 del 14/05/2009.
- COMMISSIONE PARLAMENTARE DI INCHIESTA SULLA ATTUAZIONE DEGLI INTERVENTI PER LA RICOSTRUZIONE E LO SVILUPPO DEI TERRITORI DELLA BASILICATA E DELLA CAMPANIA COLPITI DAI TERREMOTI DEL NOVEMBRE 1980 E FEBBRAIO 1981 (1991), *Relazione conclusiva, con annesse appendici, della Commissione parlamentare d'inchiesta sull'attuazione degli interventi per la ricostruzione e lo sviluppo dei territori della Basilicata e della Campania colpiti dai terremoti del Novembre 1980 e Febbraio 1981*. In attuazione alla L. 7 Aprile 1989, n.128.
- GALLI P., BOSI V., PISCITELLI S., GIOCOLI A., SCIONTI V. (2006), *Late Holocene earthquakes in southern Apennines: paleoseismology of the Caggiano fault*. J. Earth Sci. 95, 855-870.
- GALLI P., PERONACE E. (2014) *New paleoseismic data from the Irpinia fault. A different seismogenic perspective for southern Apennines (Italy)*. Earth Sci. Rev. 136, 175–201.
- GALLI P. (2020), *Roman to Middle Age Earthquakes Sourced by the 1980 Irpinia Fault: Historical, Archaeoseismological, and Paleoseismological Hints*. Geosciences 10, no. 8: 286. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080286>
- LEGGE 14 MAGGIO 1981, N. 219 (1981), *Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 19 marzo 1981, n. 75, recante ulteriori interventi in favore delle popolazioni colpite dagli eventi sismici del novembre 1980 e del febbraio 1981. Provvedimenti organici per la ricostruzione e lo sviluppo dei territori colpiti*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n.134 del 18-05-1981 - Suppl. Ordinario.
- MICHETTI A.M., ESPOSITO E., GUERRIERI L., PORFIDO S., SERVA L., TATEVOSSIAN R., VITTORI E., AUDEMARD F., AZUMA T., CLAGUE, J., COMERCI, V., GÜRPINAR A., MCCALPIN J., MOHAMMADIOUN B., MÖRNER N., OTA Y., ROGHOSIN E. (2007), *Environmental Seismic Intensity Scale – ESI 2007*. Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia.
- PANTOSTI D., SAGNOTTI L., VALENSISE G., CALDERONI G. (1989), *Paleosismicità lungo la faglia del terremoto del 23 novembre 1980*. Atti 8° Convegno GNGTS I. 53-66.
- PIZZA M. (2021), *La resilienza nell'Alta Valle del Calore (AV) 41 anni dopo il terremoto del 1980. L'esempio di Bagnoli Irpino, Cassano Irpino, Castelfranci e Montella*. Tesi in Scienze Ambientali, Università dell'Insubria. Relatore: Michetti A.M., Correlatore: Porfido S.
- PORFIDO S., ESPOSITO E., VITTORI E., TRANFAGLIA G., GUARRIERI L., PECE R. (2007), *Seismically induced ground effects of the 1805, 1930 and 1980 earthquakes in the Southern Apennines, Italy*. Ital. J. Geosci. 126, 333-346.
- PORFIDO S., ALESSIO G., GAUDIOSI G., NAPPI R., MICHETTI A.M. (2022), *40 Years Later: New Perspectives on the 23 November 1980, Ms 6.9, Irpinia-Lucania Earthquake*. Geosciences 2022, 12, 173. <https://doi.org/10.3390/geosciences12040173>
- POSTPISCHL D., BRANNO A., ESPOSITO E., FERRARI G., MARTURANO A., PORFIDO S., RINALDIS V., STUCCHI M. (1985), *The Irpinia earthquake of 23 november 1980*, in “Atlas of Isoseismal Maps of Italian Earthquakes”, a cura di D. Postpischl, CNR-PFG, Quaderni de “La Ricerca Scientifica”, n.114, vol.2A, pp.152-159.
- PROIETTI G. (1985-89), *Ministero per i Beni Culturali e Ambientali Soprintendenza generale agli interventi post-sismici in Campania e Basilicata, Dopo la polvere. Rilevazione degli interventi di recupero post-sismico del patrimonio archeologico, architettonico ed artistico delle regioni Campania e Basilicata danneggiato dal terremoto del 23 Novembre 1980 e del 14 Febbraio 1981*. 5 voll. Roma.
- ROVIDA A., LOCATI M., CAMASSI R., LOLLI, B., GASPERINI P., ANTONUCCI A. (2022), *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CP-TI15.4>
- SERVA L. (1985), *The earthquake of September 8, 1694 in Campania-Lucania*, in “Atlas of Isoseismal Maps of Italian Earthquakes”, a cura di D. Postpischl, CNR-PFG, Quaderni de “La Ricerca Scientifica”, n.114, vol.2A, pp.50-51.
- SGAMBATO C., WALKER J.P.F., ROBERTS, G. P. (2020), *Uncertainty in strain-rate from field measurements of the geometry, rates and kinematics of active normal faults: implications for seismic hazard assessment*. Journal of Structural Geology, 131, 103934.

Interventi di messa in sicurezza del sottosuolo in alcune aree di Villa De Sanctis interessate da fenomeni di sinkholes per presenza di cavità sotterranee (Roma Capitale - Municipio Roma V)

Gabriele Scandaliato

Roma Capitale, Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana

Gianluca Ferri

Roma Capitale, Dipartimento Protezione Civile

Franco Enzo Spagnuolo

Roma Capitale, Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana

Claudio Succhiarelli

Roma Capitale, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica

Email: gabriele.scandaliato@comune.roma.it

Underground soil securing in the area of Villa De Sanctis (Fifth Municipality of Rome) interested by several sinkholes phenomena due to the presence of anthropogenic cavities

Parole chiave: Roma, cavità sotterranee, sinkholes antropogenici, consolidamento del sottosuolo

Key words: Rome, underground cavities, anthropogenic sinkholes, underground soil securing

1. PREMESSA

Le cavità di origine antropica presenti nel territorio di Roma Capitale sono state oggetto di studi di carattere archeologico e geologico-tecnico sin dagli anni '60.

Con la progressiva espansione urbanistica in aree interessate da gallerie sotterranee a rete, si sono dovute spesso realizzare opere in ipogeo, come sottomurazioni per il sostegno delle fondazioni degli edifici sovrastanti e occlusioni dei relativi pozzi di accesso e di aerazione. Tali reti di gallerie si rinvenivano spesso a seguito di fenomeni di sprofondamento del suolo per crollo delle volte con la formazione di voragini più o meno estese in superficie.

Le cause di tali sprofondamenti sono principalmente da attribuirsi alla diminuzione delle resistenze geomeccaniche dei depositi che costituiscono le volte, da processi di alterazione chimica e disgregazione fisica, da sollecitazioni in superficie (scavi per l'alloggiamento di sottoservizi, vibrazioni indotte dal traffico veicolare di superficie, ecc..) e da exfiltrazioni dalle reti idriche o fognarie.

Per la gestione della problematica del Parco Villa De Sanctis si è reso necessario realizzare un coordinamento delle attività tra i geologi e i tecnici dei Dipartimenti di Roma Capitale (Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, Dipartimento Protezione Civile e Dipartimento Pro-

grammazione e Attuazione Urbanistica), finalizzato ad approfondire in modo permanente le conoscenze sul sottosuolo e la programmazione e progettazione degli interventi.

In particolare, a seguito di eventi di sprofondamento che producono il rinvenimento di nuove parti di reti caveali o, anche, a seguito di eventi ricollegabili alla possibile presenza di gallerie sotterranee, il coordinamento dispone la gestione di una serie di attività: rilievi speleo-topografici per la mappatura

delle rete caveale, rilevamenti geomorfologici in ipogeo, indagini conoscitive per la caratterizzazione geologico-geotecnica dell'ammasso interessato dalle gallerie, valutazione della pericolosità e del rischio di crollo, progettazione ed esecuzione degli interventi di messa in sicurezza del sottosuolo.

Nel presente articolo si relaziona sull'esperienza acquisita relativa agli interventi di messa in sicurezza di parti del sistema caveale sottostante all'area del Parco di Villa de Sanctis e a quelle ad es-

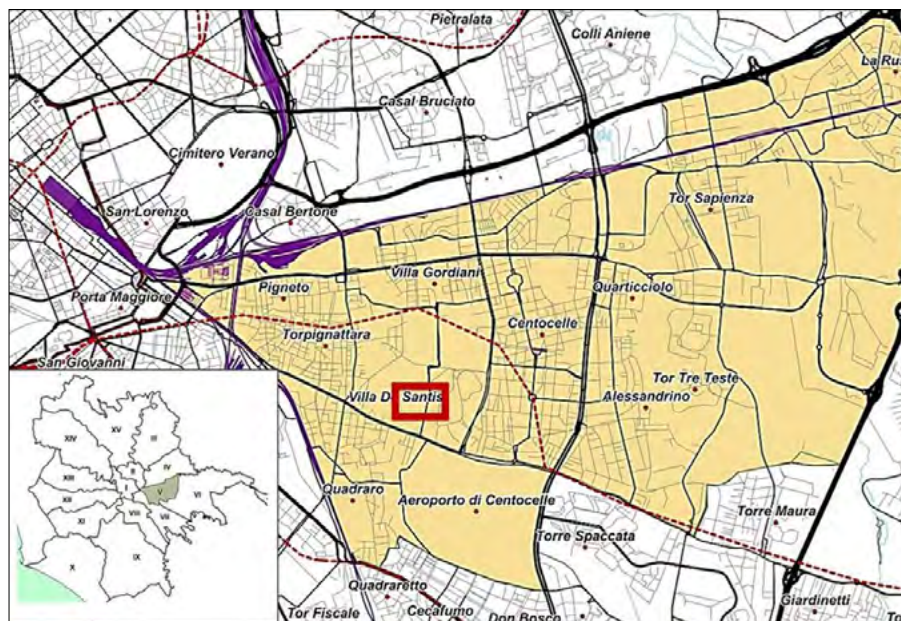


Figura 1. Localizzazione amministrativa del Municipio Roma V nel territorio di Roma Capitale e all'interno, con il rettangolo in rosso, l'ubicazione dell'area di intervento

sa adiacenti. Questa zona, compresa tra via Casilina a Sud, via della Primavera ad Est e via Labico a Nord e ad Ovest, è caratterizzata dalla presenza di un'estesa rete di gallerie sotterranee legate ad attività estrattiva di pozzolana, con tecnica di scavo a camere e pilastri.

Le attività di estrazione hanno interessato maggiormente la formazione delle Pozzolane Nere (PNR) e, in limitati luoghi, dalle cd. Pozzolanelle - VSN2 (Mazza *et al.*, 2008).

A seguito del manifestarsi di alcuni eventi di dissesto in superficie, la Direzione della Protezione Civile capitolina, in collaborazione con il Dipartimento Programmazione ed Attuazione Urbanistica, il Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana e con il supporto dell'Associazione Speleologica "Roma Sotterranea", ha avviato un'attività di studio per valutare e mappare la pericolosità dovuta a fenomeni di sprofondamento del suolo (Roma Capitale, Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, U.O. 4 Nuove Opere Stradali e Fognature, 2015).

Tale attività è consistita in rilievi speleologici per la ricostruzione dell'andamento planoaltimetrico della rete (Roma Sotterranea S.r.l., 2018), rilievi geomorfologici per la mappatura delle forme gravitative di crollo dei depositi detritici di accumulo, delle lesioni e/o fratture strutturali (Succhiarelli *et al.*, 2017a; Succhiarelli *et al.*, 2017b), che caratterizzano le cavità, unitamente a infiltrazioni idriche provenienti da reti fognarie e acquedottistiche.

I rilievi geomorfologici sono stati integrati, laddove necessario, da indagini geognostiche (Servizi Geotecnici S.r.l., 2018) per la caratterizzazione dei materiali, al fine di procedere alla valutazione della stabilità delle calotte delle gallerie che hanno consentito di mettere in correlazione le criticità geomorfologiche delle cavità con le infrastrutture e gli insediamenti urbani di superficie.

Da tale correlazione è stato possibile realizzare le cartografie di pericolosità e di rischio, propedeutiche alla progettazione e agli interventi di messa in sicurezza.

2. DESCRIZIONE DELL'AREA DI INTERVENTO. CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOLOGICA

L'area in esame si estende nel settore nord-occidentale del Distretto Vulcanico dei Colli Albani, la cui attività

si è in particolare manifestata alla fine del Pleistocene inferiore con i processi tettonici distensivi che hanno interessato l'evoluzione del margine tirrenico laziale.

I terreni affioranti nell'area di studio sono riferibili alla fase vulcanica nota in letteratura come *fase del Tuscolano-Artemisio*, datata Pleistocene medio, che prende il nome dal bordo calderico costituito dai Monte Tuscolo a Nord e dall'Artemisio a Sud.

Nel territorio del Parco Villa De Sanctis sono presenti in affioramento i prodotti piroclastici albanici riferibili in particolare alla Formazione di Villa Senni, Unità delle Pozzolanelle e del Tufo Lionato, e alle Pozzolane Rosse. Si tratta di depositi piroclastici massivi, di colore da viola a nero, a matrice da cineritico a grossolana-lapillosa, poveri in fini e ricchi di cristalli di leucite, biotite e clinopirosseno, contenenti grosse scorie nere, generalmente incoerenti. Lapilli e blocchi di litici lavici e olocristallini possono raggiungere il 30% del deposito. La composizione è tefrifonolitica e fonotefritica e sono frequenti strutture da degassamento (Pleistocene medio p.p.). (Servizi Geotecnici S.r.l., 2018).

Particolare importanza ai fini della valutazione della pericolosità da sprofondamento del suolo, acquista la presenza e lo spessore del Tufo Lionato, caratterizzato da comportamento geomeccanico lapideo-semilapideo e pertanto rappresenta una limitazione all'evoluzione verso la superficie delle sottostanti reti caveali e alla formazione di voragini (Lanzini, 2015).

La presenza di cavità sotterranee nell'area di intervento è stata riportata in diversi studi:

- nelle prime cartografie che hanno riguardato questa problematica, "Cavità sotterranee" (Ventriglia, 1971) e "Carta delle cavità sotterranee" (Ventriglia, 2002), dove il sito in esame ricade per la maggior parte in "zone nelle quali è probabile l'esistenza di cavità sotterranee nelle rocce vulcaniche", a causa di mancanza di segnalazioni dirette e parte in "zone nelle quali è molto probabile l'esistenza di cavità sotterranee" date le abbondanti segnalazioni di cavità con estensione direttamente accertata o gruppi di cavità tra loro ricollegabili;
- lo stralcio della "Carta Presenza delle Cavità" e i "Profili della presenza di cavità" di cui allo "Studio geologico preliminare inerente le problematiche di rischio di crollo di cavità nel territorio della VI Circoscrizione

ne del Comune di Roma" (Comune di Roma, Circoscrizione VI e Università degli Studi "Roma Tre", Dipartimento di Scienze Geologiche, 2000);

- "Carta delle cavità sotterranee di Roma" (Nisio *et al.*, 2017), redatta da Roma Capitale, ISPRA, CNR, Protezione Civile Nazionale, Roma Metropolitane e le principali Associazioni Speleologiche di Roma, che evidenzia la presenza di cavità e cunicoli ipogei nell'area oggetto di studio, all'interno dei depositi piroclastici.

3. INDAGINI CONOSCITIVE ESEGUITE

Le indagini conoscitive indicate in premessa hanno consentito di ricostruire l'andamento, l'estensione e lo stato di conservazione delle cave soggiacenti all'area di intervento.

L'intradosso delle volte delle cavità si rinviene ad una profondità compresa tra 5 e 11 m dalla superficie urbana e le gallerie di cava hanno una altezza variabile dai 2 ai 4 m circa.

La loro ispezione diretta ha consentito di rilevare aree di crollo sotterraneo ubicate sia all'interno del Parco Villa De Sanctis, sia in corrispondenza delle aree sulle quali insiste l'impianto sportivo del Parco (spogliatoi, campi da calcetto e da tennis), che all'area di parcheggio veicoli a servizio del centro sportivo.

Lo studio è stato esteso anche all'area del giardino pubblico di via Romolo Balzani, dove è stata accertata la presenza di due estese aree di crollo con spessore residuo compreso tra la volta e il piano campagna inferiore a 2 m e con l'evidenza di apparati radicali delle specie arboree ivi presenti che hanno contribuito in maniera significativa alla migrazione dei tratti di galleria verso la superficie.

Nello stralcio planimetrico della mappa del rischio di Fig. 2 sono state indicate con colore viola le aree in crollo ad alta pericolosità.

Le campagne di indagini geognostiche eseguite nel 2015 e nel 2018 sono rispettivamente consistite in:

- n. 12 sondaggi a distruzione di nucleo e videoispezioni in foro (ove intercettate cavità).
- n. 3 sondaggi a distruzione di nucleo e n. 1 sondaggio a carotaggio continuo con n. 3 prove SPT e prelievo di n. 1 campione indisturbato.

Detti sondaggi, spinti fino alla profondità di 14 m dal p.c., hanno evidenziato un assetto litostratigrafico costitu-



Figura 2. Stralcio planimetrico della mappa della pericolosità da crollo, in viola le aree ad alta pericolosità sulle quali è stato eseguito l'intervento di messa in sicurezza

ito, dall'alto verso il basso, da un primo livello ascrivibile a riporto antropico di natura vulcanica, sabbioso, poco addensato, di colore marrone, al quale succedono i depositi piroclastici albiani da incoerenti a litoidi, intercettabili fino a fondo foro posto a circa 12 m dal piano campagna.

La profondità delle volte è stata rinvenuta da circa 6,5 a 9 m dalla superficie urbana esterna, mentre il piano di calpestio delle cave si attesta ad una profondità massima relativa di 13 m e altezza delle gallerie pari a circa 4 m.

4. VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ E DEL RISCHIO DI SPROFONDAMENTO DEL SUOLO

Lo sviluppo plano-altimetrico delle cave è a tratti regolare assimilabile a una maglia di forma quadrata, con gallerie di elevata estensione lineare. La loro larghezza media è pari a circa 4 m. Nel corso degli anni alcune porzioni sono stati adibite a diversi utilizzi quali, ad esempio, cantine o fungaie. Le indagini e i rilievi sotterranei hanno consentito di individuare le zone maggiormente critiche interessate da dissesti per crollo delle volte (Succhiarelli *et al.*, 2017c) ed in particolare sono state individuate 6

diverse zone di intervento come di seguito elencate:

- 1) Giardino Casilino 23 di via Romolo Balzani (area 1);
- 2) Area panchina (interno Parco) e campo da tennis del Circolo sportivo (area 2);
- 3) Parcheggio del Circolo Sportivo (area 3);
- 4) Spogliatoi del Circolo Sportivo (area 4);
- 5) Area siderurgica lavorazione metalli (area 5);
- 6) Campo da calcio a 5 del Circolo Sportivo (denominata area 10);

Nella Fig. 2 è riportato uno stralcio della mappa di pericolosità per sprofondamento del suolo con individuazione delle aree critiche tramite scala cromatica.

5. DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO DI MESSA IN SICUREZZA

Dopo aver eseguito la mappatura della pericolosità e valutato il rischio sulla base delle degli elementi esposti sul territorio (Succhiarelli *et al.*, 2017d), sono stati progettati gli interventi di messa in sicurezza delle aree sopra indicate. Il progetto ha previsto tecniche di intervento finalizzate a realizzare un riempimento compatibile al mantenimento

degli attuali usi e destinazioni delle aree in superficie.

In fase di esecuzione, come meglio descritto nel seguito, la direzione lavori, in collaborazione con l'impresa esecutrice, ha ritenuto opportuno approfondire le conoscenze geometriche delle cavità per una precisa calibrazione e taratura degli interventi di messa in sicurezza, articolata nelle seguenti fasi:

1. esecuzione rilievo laser scanner georeferenziato. Esso ha consentito di conoscere nel dettaglio l'andamento e la morfologia interna delle cavità, nonché il posizionamento nel sottosuolo delle sezioni di confinamento delle gallerie in funzione delle loro caratteristiche morfologiche. Ha permesso inoltre di individuare le zone di stabilità delle calotte e delle pareti per predisporre in ambiente confinato condizioni di sicurezza sul lavoro, ottenendo al contempo la minimizzazione dell'area di confinamento e dei volumi di riempimento per ridurre i tempi e i costi di esecuzione;
2. realizzazione dei confinamenti tramite micropali di 100 mm di diametro (non strutturali) con spessore di 1 cm e casserature in legno di 50 mm di spessore realizzate in ipogeo e ancorate ai micropali;

3. riempimento tramite miscele betonabili e pompabili (in funzione del grado di sicurezza delle aree relativamente al transito dei mezzi pesanti), realizzato con aggregati inerti di riciclo;
4. localizzazione dei punti della calotta delle cavità più prossime al piano campagna al fine di realizzare in superficie i fori di riempimento, garantendo il completo colmamento dei vuoti;
5. ripristino delle condizioni di fruibilità delle aree in superficie.

Le attività sono state eseguite con l'assistenza di archeologi, così come prescritto dalla Pontificia Commissione di Archeologia Sacra, dalla Soprintendenza Speciale Archeologia Belle Arti e Paesaggio di Roma e dalla Sovrintendenza Capitolina ai Beni Culturali.

Il riempimento dei vuoti è stato eseguito tramite miscela cementizia costituita da inerti di riciclo provenienti da attività di demolizione e costruzione (construction and demolition waste - C&D W).

Ai fini della determinazione della miscela compatibile sono state svolte prove in situ e in laboratorio su diversi mix design per l'individuazione dei materiali che garantissero le caratteristiche prestazionali previste dal progetto, non-



Figura 3. Foto del campo di prova per la determinazione della permeabilità delle miscele cementizie da usare in fase di riempimento

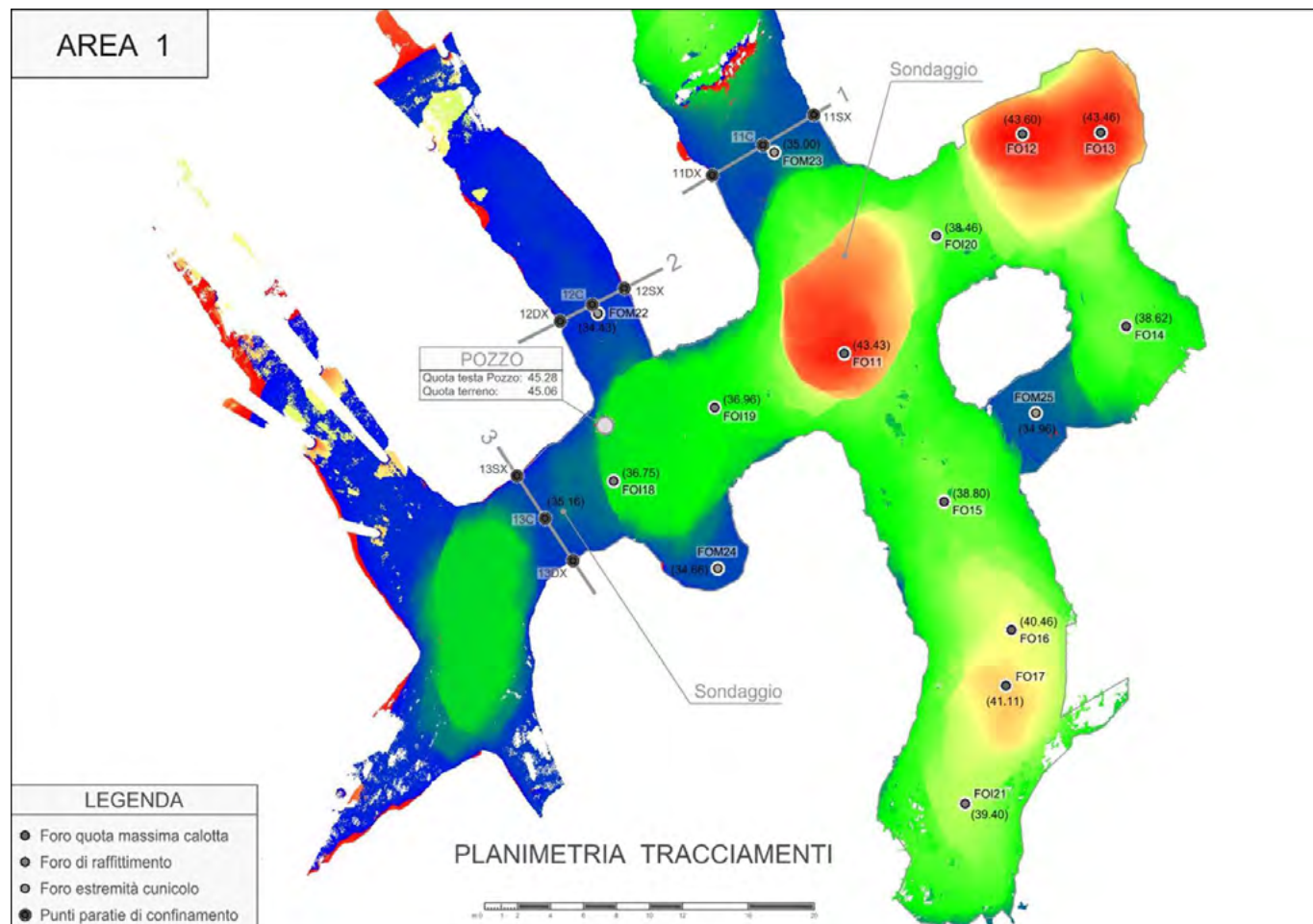


Figura 4. Restituzione 3D del rilievo laser scanner dell'area 1, in rosso le aree con minori spessori di ricoprimento delle calotte delle gallerie

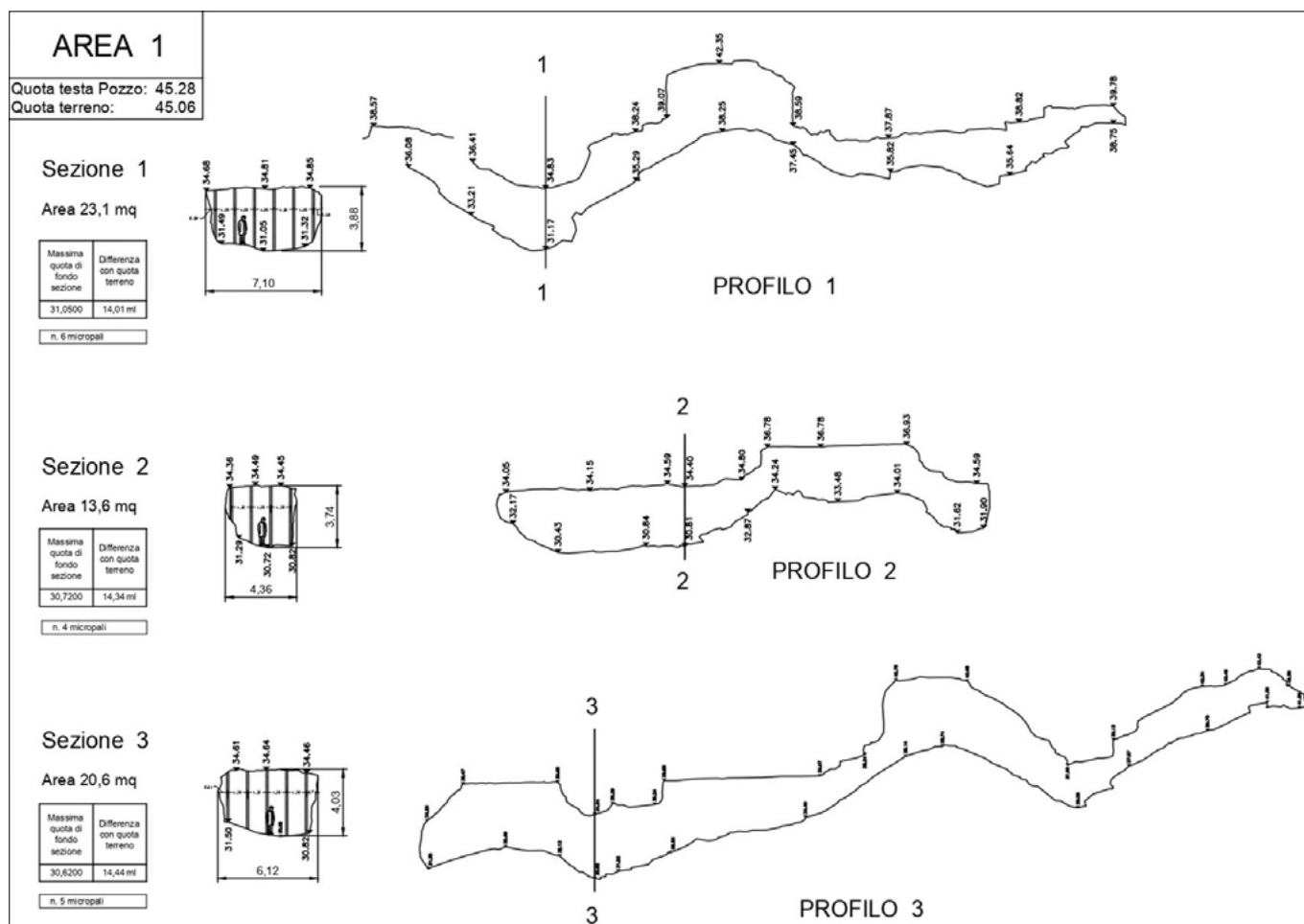


Figura 5. Profili longitudinali di alcuni tratti di gallerie oggetto di intervento ricadenti nell'area 1 con individuazione delle sezioni di confinamento

ché caratteristiche di pompabilità per la messa in opera.

In particolare sono state eseguite prove di permeabilità in situ (Fig. 3) tramite percolazione in pozzetto pre-stampato e prove di pompabilità.

La scelta della miscela pompabile è stata definita con un contenuto in cemento di circa 120 kg/m³ avente un co-

efficiente di permeabilità k compreso tra $6,37 \times 10^{-6}$ cm/s e $5,40 \times 10^{-6}$ cm/s. Le prove di laboratorio in fase di collaudo hanno restituito un valore di resistenza a compressione R_{ck} compreso tra 0,88 N/mm² e 1,40 N/mm², soddisfacendo così i requisiti richiesti.

La miscela betonabile, caratterizzata da una quantità di cemento di circa 40

kg/m³ e un coefficiente di permeabilità K compreso tra 1×10^{-3} cm/s e 1×10^{-5} cm/s ed un $R_{c28} \geq 2,5$ daN/cm², è stata utilizzata nelle aree logisticamente accessibili dai mezzi pesanti.

In fase esecutiva si è optato per un maggiore utilizzo della miscela pompabile, in quanto la maggior parte delle aree di intervento, a seguito dei dati ottenuti dal rilievo laser scanner, non era stata ritenuta idonea al transito di mezzi pesanti quali betoniere a pieno carico.

Nelle Figg. 4, 7, 11 e 15 sono riportati alcuni stralci della restituzione 3D del rilievo laser scanner, con scala cromatica che rappresenta le diverse quote dal piano campagna (in rosso le zone con minore copertura in calotta). Nelle Figg. 5, 8, 9, 12, 13 16 e 17 sono riportate alcune sezioni e profili delle gallerie oggetto di intervento. Nelle Figg. 6, 10, 14 e 18 sono riportate le foto di alcune sezioni di confinamento realizzate con tavolame e micropali.

5.1 - AREA 1

L'area 1 è ubicata in corrispondenza del Giardino Casilino di Via Romolo Balzani. Sono state individuate 3 sezioni di confinamento per un totale di circa 58 m² e un volume di riempimento di circa 1.806 m³.



Figura 6. Foto di una delle sezioni di confinamento realizzate con tavolame e micropali eseguite nell'area 1

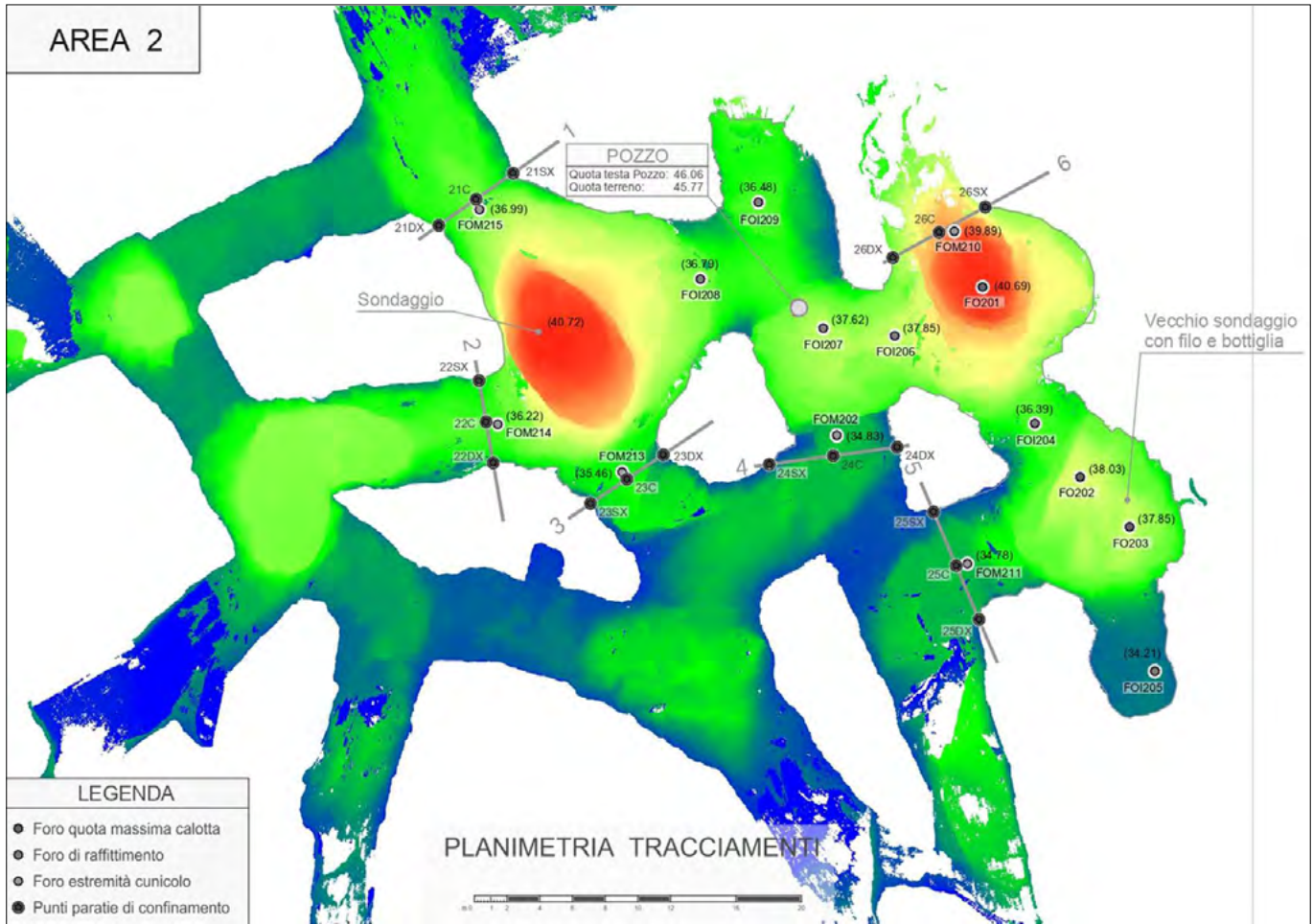


Figura 7. Restituzione in 3D del rilievo laser scanner effettuato nell'area 2, in rosso le aree con minori spessori di ricoprimento delle calotte delle gallerie

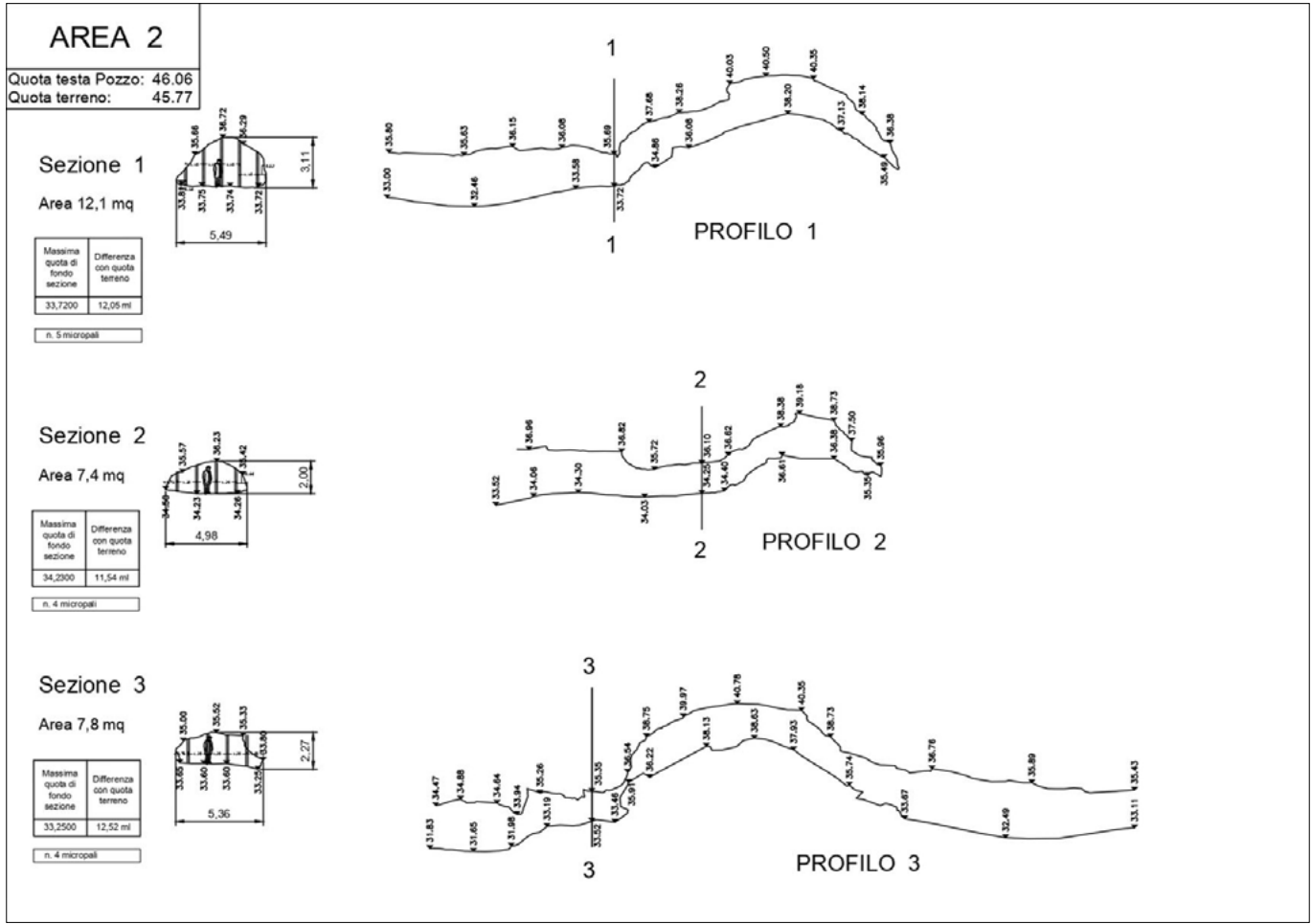


Figura 8. Profili longitudinali di alcuni tratti di gallerie oggetto di intervento ricadenti nell'area 2 con individuazione delle sezioni di confinamento

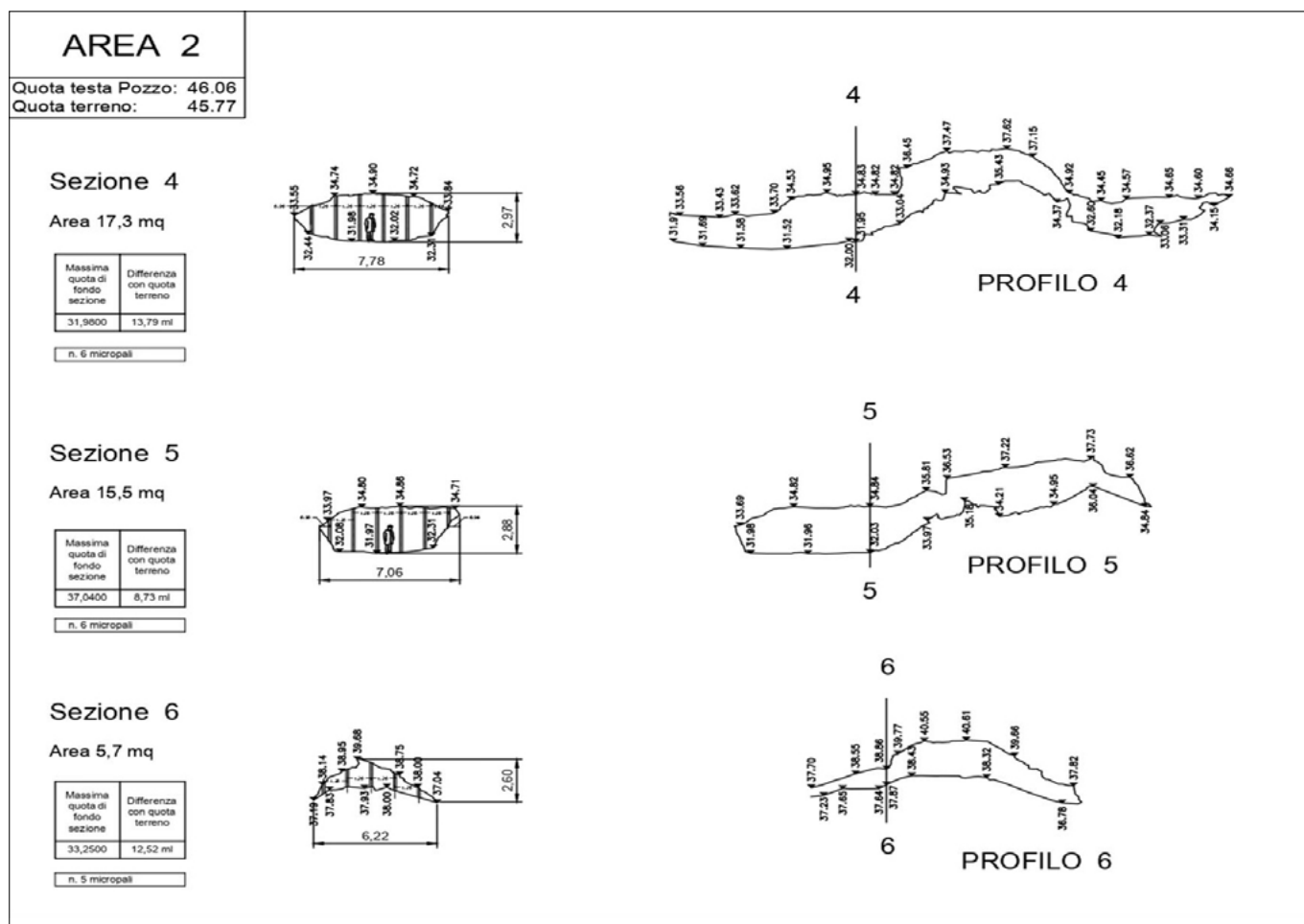


Figura 9. Profili longitudinali di alcuni tratti di gallerie oggetto di intervento ricadenti nell'area 2 con individuazione delle sezioni di confinamento



Figura 10. Foto di una delle sezioni di confinamento realizzate con tavolame e micropali eseguite nell'area 2

5.2 - AREA 2

L'Area 2 è ubicata all'interno del Parco Villa De Sanctis e comprende anche una parte dei campi da Tennis della Polisportiva De Sanctis. Per il confinamento di tali cavità sono state individuate 6 se-

zioni per un totale di circa 67 m² e un volume di riempimento di circa 1.114 m³.

5.3 - AREA 5

L'area 5 è ubicata in corrispondenza dell'attività siderurgica posta a Nord

Ovest del Parco Villa De Sanctis. Per il confinamento delle cavità sono state individuate 5 sezioni per un totale di circa 33 m² di superficie e un volume di riempimento pari a circa 728 m³.

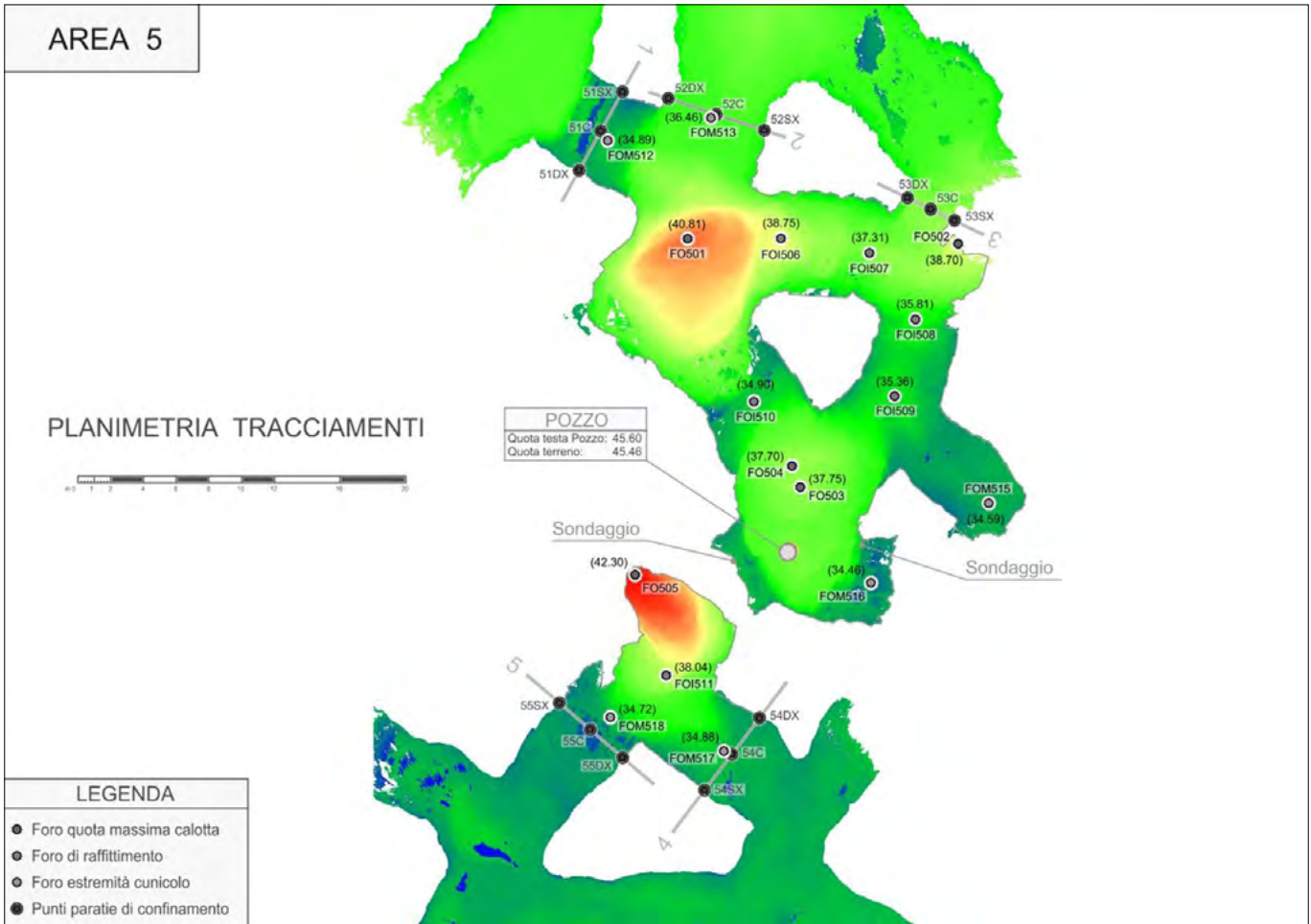


Figura 11. Restituzione 3D del rilievo laser scanner dell' area 5, in rosso le aree con minori spessori di ricoprimento delle calotte delle gallerie

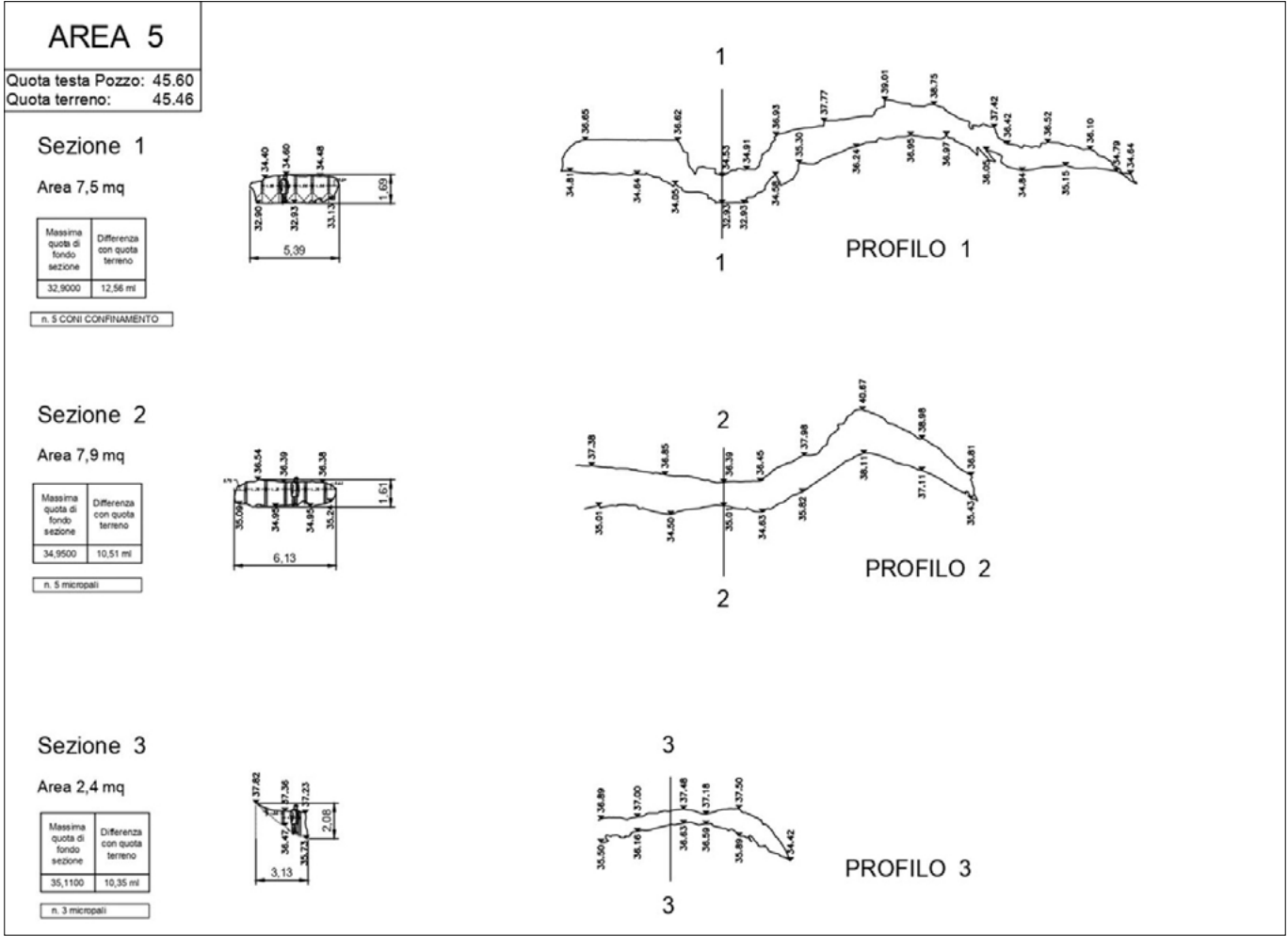


Figura 12. Profili longitudinali di alcuni tratti di gallerie oggetto di intervento ricadenti nell'area 5 con individuazione delle sezioni di confinamento

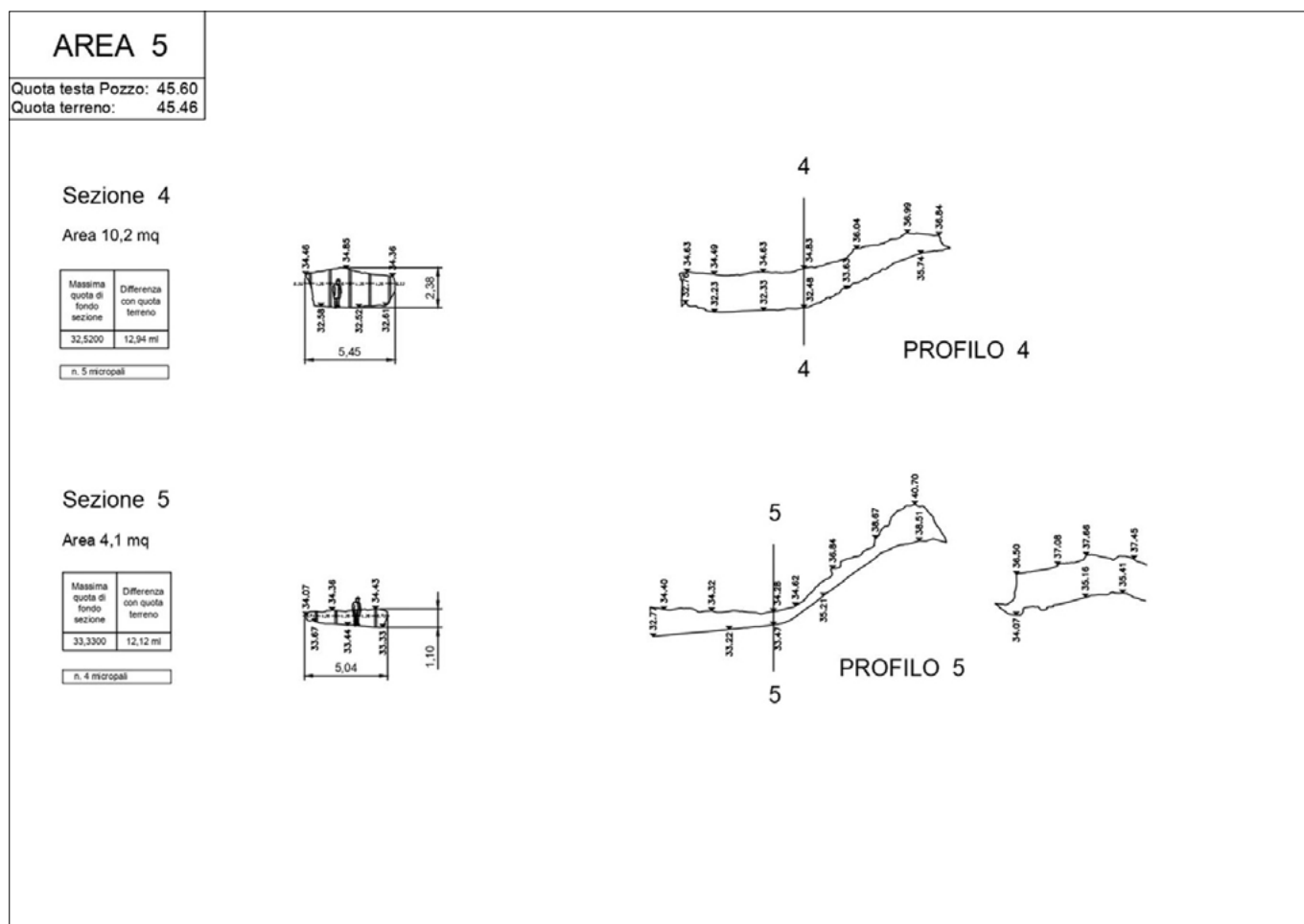


Figura 13. Profili longitudinali di alcuni tratti di gallerie oggetto di intervento ricadenti nell'area 5 con individuazione delle sezioni di confinamento



Figura 14. Foto di una delle sezioni di confinamento realizzate con tavolame e micropali eseguite nell'area 5

5.4 - AREA 10

L'Area 10 ricade all'interno dei campi da calcio della Polisportiva De Sanctis ubicati a sud del Parco Villa De Sanctis. Per il confinamento di tali cavità sono state individuate 6 sezioni per un totale di circa 66 m² di superficie e

un volume complessivo di riempimento pari a circa 1.473 m³.

6. FASE DI RIEMPIMENTO DELLE CAVITÀ

Il riempimento delle cavità è stato eseguito attraverso fori di perforazione

realizzati in corrispondenza dei punti in cui le profondità delle volte delle gallerie erano più prossime al piano urbano esterno.

Le fasi di riempimento sono avvenute sotto controllo da parte degli speleologi che hanno monitorato l'immissione

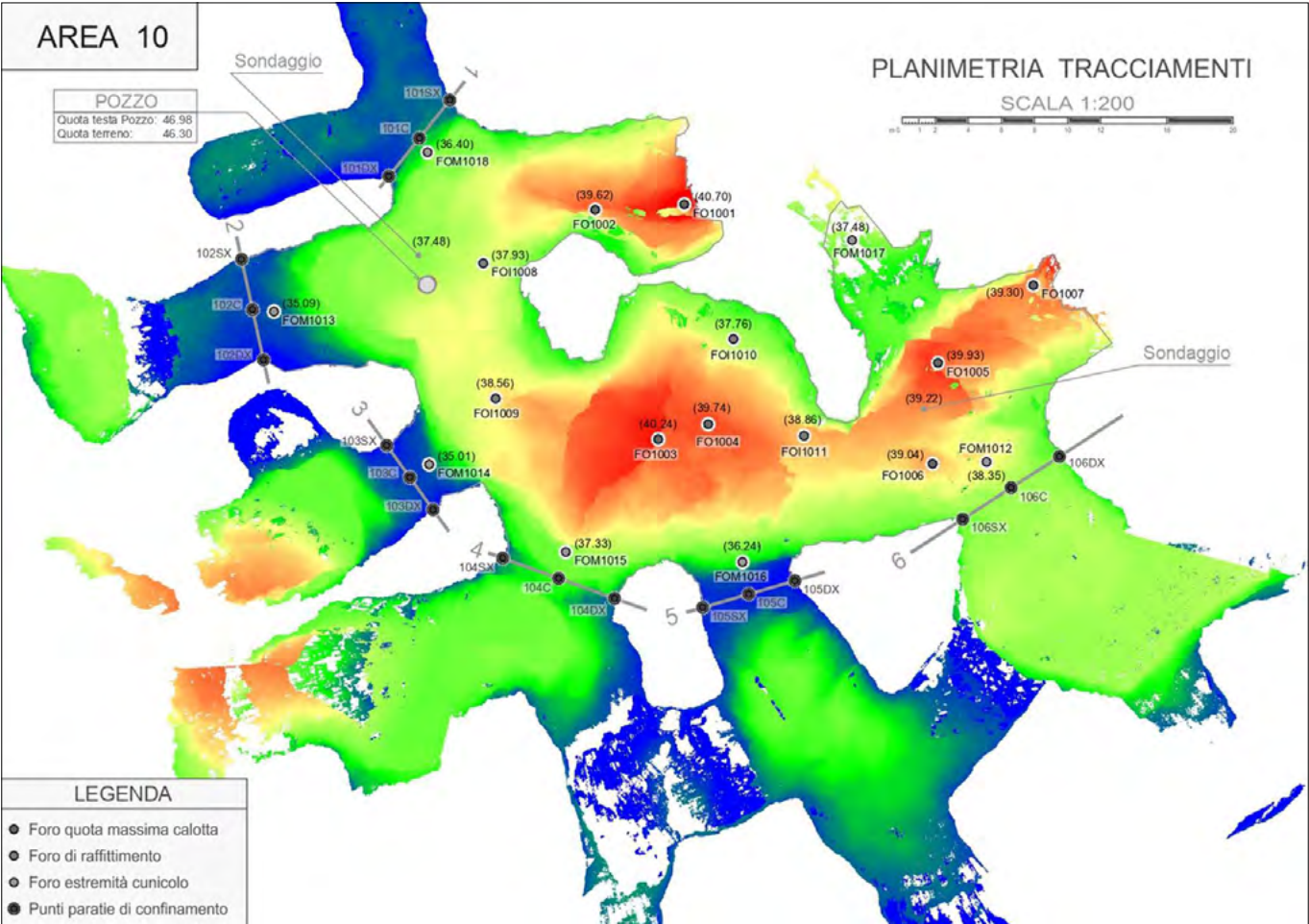


Figura 15. Restituzione 3D del rilievo laser scanner – area 10, in rosso le aree con minori spessori di ricoprimento delle calotte delle gallerie

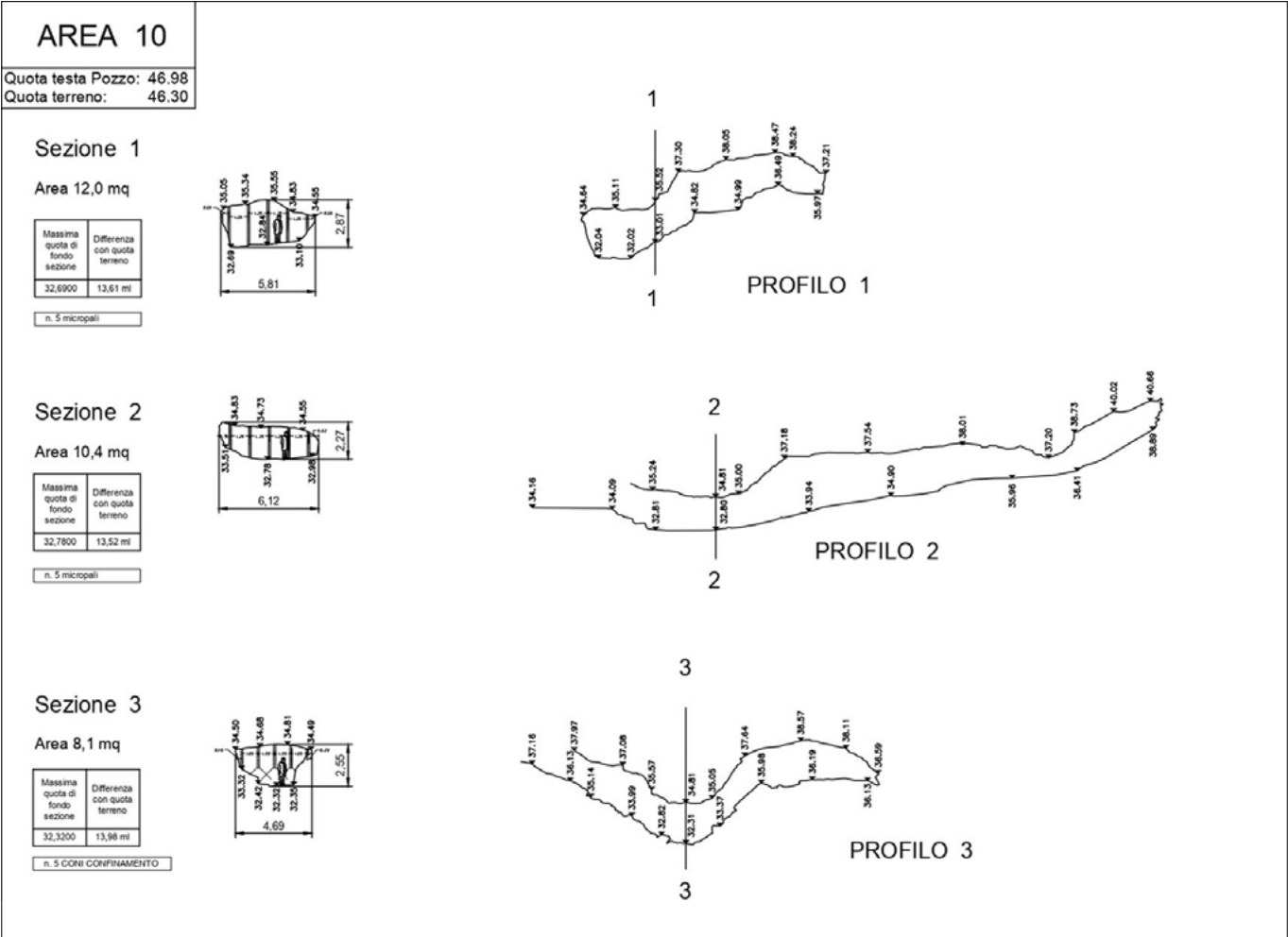


Figura 16. Profili longitudinali di alcuni tratti di gallerie oggetto di intervento ricadenti nell'area 10 con individuazione delle sezioni di confinamento

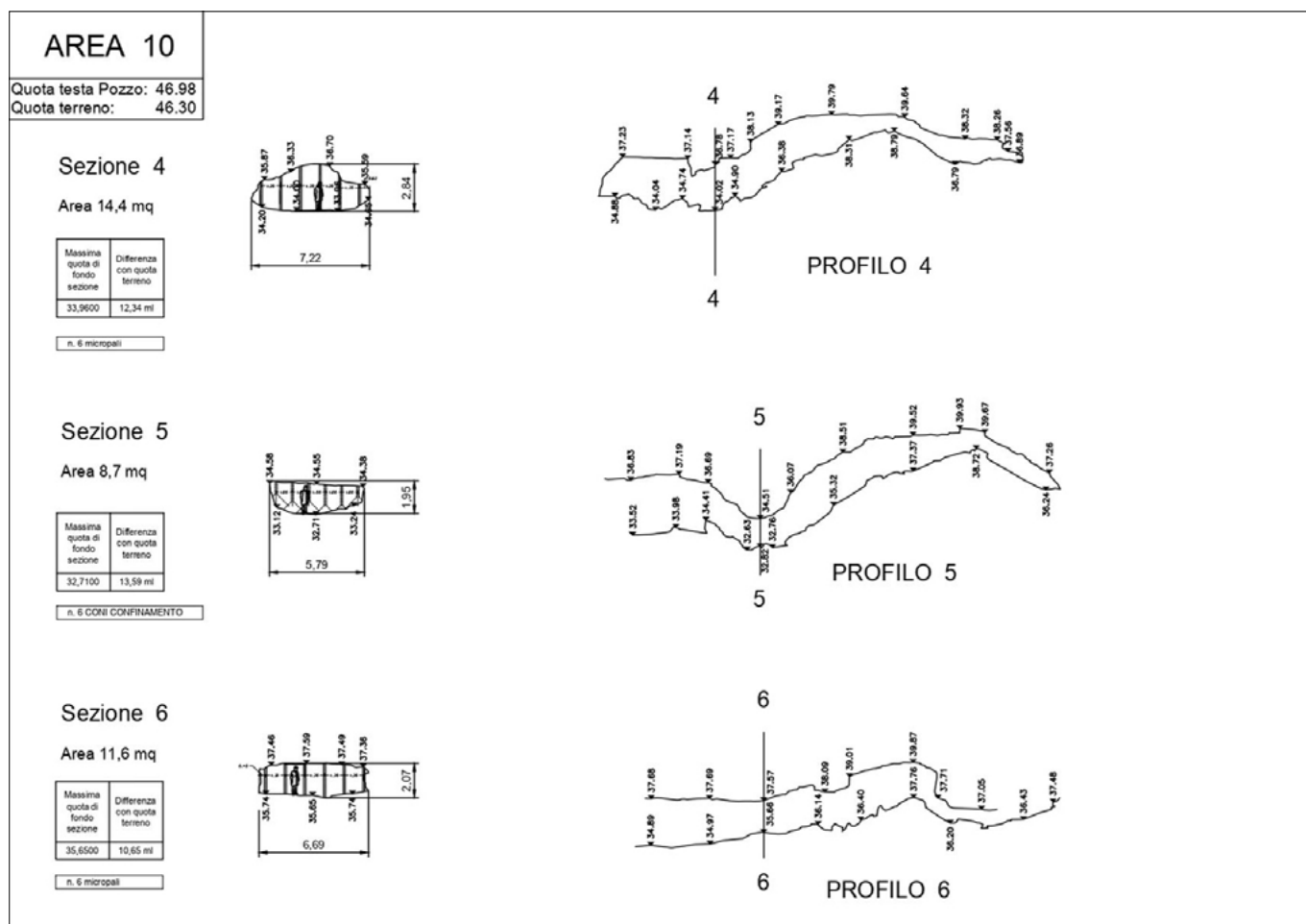


Figura 17. Profili longitudinali di alcuni tratti di gallerie oggetto di intervento ricadenti nell'area 10 con individuazione delle sezioni di confinamento



Figura 18. Foto di una delle sezioni di confinamento realizzate con tavolame e micropali eseguite nell'area 10

della miscela cementizia, la tenuta dei confinamenti e la corretta esecuzione di tali lavorazioni.

Nell'area 1 (Giardino Casilino di via Romolo Balzani) il riempimento è avvenuto anche attraverso uno scavo a cielo

aperto in quanto la volta della cavità era in chiara fase emersiva e prossima al piano campagna.

Ad evitare la demolizione e il successivo rifacimento di un secondo campo da calcetto, nell'area n. 10 (campi da

Calcio della Polisportiva De Sanctis) sono state eseguite perforazioni inclinate tali da potere intercettare le cavità da riempire.



Figura 19. Foto della fase di esecuzione di perforazioni inclinate nell'area 10 per la realizzazione dei fori di immissione della miscela cementizia



Figura 20. Foto della fase di getto della miscela con autopompa



Figura 21. Foto della fase di getto della miscela con autopompa



Figura 22. Foto della fase di getto della miscela attraverso scavo a cielo aperto

7. CONCLUSIONI

Nel presente articolo sono state descritte le scelte tecniche adottate per la messa in sicurezza di 6 aree a rischio di sprofondamento del suolo per la presenza di cavità sotterranee di origine antropica nell'area del Parco Villa De Santis, Municipio Roma V.

Per un'efficiente gestione tecnica degli interventi eseguiti, si è reso necessario realizzare un coordinamento tra geologi e ingegneri dei Dipartimenti di Roma Capitale (Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, Dipartimento Protezione Civile e Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica).

Il coordinamento ha consentito di affrontare l'emergenza dei dissesti per

Tabella 1. Riepilogo dei calcoli relativi ai volumi di riempimento (stima da rilievo laser scanner eseguito in aree accessibili in cavità)

AREA	Riempimento Pozzo di Accesso (m ³)	Riempimento Cavità 1 (m ³)	Riempimento Cavità 2 (m ³)	TOTALE (m ³)
1	6,5	1806,2		1812,7
2	6,8	1107,8		1114,6
5	6,4	621,7	100,3	728,4
10	6,6	1466,2		1472,8
TOTALE	26,3	5102,2		5128,5

Tabella 2. Miscela di riempimento effettivamente utilizzata in tutte le aree. Per motivi di sicurezza, dovuti al passaggio dei mezzi pesanti su aree a pericolosità elevata, si è privilegiato l'utilizzo della miscela pompabile. Laddove le condizioni del sottosuolo e l'assenza di cavità superficiali lo permettevano, è stata utilizzata la miscela betonabile. La differenza tra i volumi calcolati dal rilievo laser scanner e quelli effettivamente utilizzati sono dovuti alla presenza di materiale detritico localizzato sul piano di calpestio delle cave

AREA	Miscela Pompabile (m ³)	Miscela Betonabile (m ³)
1 - 2 - 5 - 10	5900	0
3 - 4	24	637
Totale parziale	5924	637
TOTALE		6561

sinkhole dall'evento fino all'ultima fase di realizzazione delle opere di messa in sicurezza del territorio.

I rilievi speleologici e geomorfologici e le indagini geognostiche hanno permesso di eseguire le mappe di pericolosità e rischio, e quindi le informazioni di base per la successiva progettazione ed esecuzione degli interventi.

In fase esecutiva si è realizzato un rilievo laser scanner georeferenziato che ha permesso di definire con precisione la geometria, morfologia e posizione nel sottosuolo delle cavità, nonché individuare con accuratezza le sezioni di confinamento e la realizzazione dei relativi micropali e cassetture in legno in modo efficiente ed efficace, garantendo nel contempo la sicurezza dei lavori seguiti in cavità.

Ciò ha consentito di definire i volumi di riempimento e l'ubicazione in superficie dei punti di perforazione per l'esecuzione dei confinamenti e, in particolare, quelli di immissione delle miscele cementizie, costituite da aggregati inerti di riciclo, per la messa in sicurezza delle cavità tramite colmamenti.

BIBLIOGRAFIA

COMUNE DI ROMA, CIRCOSCRIZIONE VI E UNIVERSITÀ DEGLI STUDI "ROMA TRE", DIPARTIMENTO DI SCIENZE GEOLOGICHE (2000), *Studio geologico preliminare inerente le problematiche di rischio di crollo di cavità nel territorio della VI Circoscrizione del Comune di Roma*, studio tecnico interno, relazione e cartografie tematiche, Roma.

FUNICIELLO, R., PRATURLON, A., GIOR-DANO, G. (a cura di) (2008), *La geologia*

di Roma: dal centro storico alla periferia in Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, LXXX, 2 volumi, pp. 444 (2), 314 illustrazioni in b/n e a colori nel testo, Istituto Poligrafico dello Stato, Firenze.

LANZINI M. (2015), *Il rischio voragine nel Municipio V di Roma Capitale*, Professione Geologo, n. 45, pagg. 19 - 22, Ordine dei Geologi del Lazio, Roma.

MAZZA, R., CAPELLI, G., LANZINI, M. (2008), *Rischio di crollo di cavità nel territorio del VI Municipio del Comune di Roma*, Memorie descrittive della Carta Geologica d'Italia, LXXX, parte seconda, pp. 149-170, Istituto Poligrafico dello Stato, Firenze.

NISIO S., ALLEVI M., CIOTOLI G., FERRI G., FIORE R., LANZINI M., ROMA M., PAOLUCCI R., STRANIERI I., SUCCHIARELLI C. (2017), *Carta delle cavità sotterranee di Roma*, 4 fogli, scala 1: 15.000, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

ROMA CAPITALE, DIPARTIMENTO COORDINAMENTO SVILUPPO INFRASTRUTTURE E MANUTENZIONE URBANA, U.O. 4 NUOVE OPERE STRADALI E FOGNATURE (2015), *Indagini, monitoraggi e controlli a seguito dei dissesti geologici e idrogeologici nel territorio di Roma Capitale. Cantiere di Villa De Sanctis e Via dei Gordiani Municipio Roma V*, relazione tecnica interna, pag. 1-16, Roma.

ROMA SOTTERRANEA S.R.L. (2018), *Ambienti Sotterranei nell'area di Villa De Sanctis*, relazione tecnica interna, pag. 1-12, con 2 cartografie, tav. 1 planimetria delle cavità, scala 1:1.000, tav. 2 sezioni di confinamento, scala 1:50, Roma Capitale, Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, Centrale Unica Lavori Pubblici, Roma.

SERVIZI GEOTECNICI S.R.L. (2018), *Lavori di verifica propedeutici al risanamento delle sedi stradali a seguito di eventi e criticità col-*

legati al dissesto idrogeologico, Villa de Sanctis - Municipio Roma V, Roma, Resoconto Tecnico interno, pag. 1-22 con allegati (certificati delle prove in sito), Roma Capitale, Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, Centrale Unica Lavori Pubblici, Roma.

SUCCHIARELLI C., FERRI G., ALLEVI M., SCOTTO G. A., AMATORI R., TINTI S. (2017a), *Rilevamento di parte delle cavità sotterranee soggiacenti al Parco Villa de Sanctis e aree adiacenti. Interventi preliminari di messa in sicurezza (Municipio Roma V)*, relazione tecnica interna, pag. 1-14, Roma Capitale, Ufficio Extradipartimentale Politiche Della Sicurezza e Protezione Civile, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Dipartimento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, Roma.

SUCCHIARELLI C., FERRI G., ALLEVI M., SCOTTO G. A., AMATORI R., TINTI S. (2017b), *Carta del rilevamento geomorfologico di parte delle cavità sotterranee del Parco Villa de Sanctis e aree adiacenti (Municipio Roma V)*, carta tecnica interna, 1 foglio, Roma Capitale, Ufficio Extradipartimentale Politiche Della Sicurezza e Protezione Civile, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Dipartimento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, Roma.

SUCCHIARELLI C., FERRI G., ALLEVI M., SCOTTO G. A., AMATORI R., TINTI S. (2017c), *Carta della pericolosità di parte delle cavità sotterranee del Parco Villa de Sanctis e aree adiacenti (Municipio Roma V)*, carta tecnica interna, 1 foglio, Roma Capitale, Ufficio Extradipartimentale Politiche Della Sicurezza e Protezione Civile, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Dipartimento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, Roma.

SUCCHIARELLI C., FERRI G., ALLEVI M., SCOTTO G. A., AMATORI R., TINTI S. (2017d), *Carta del rischio relativo di parte delle cavità sotterranee del Parco Villa de Sanctis e aree adiacenti (Municipio Roma V)*, carta tecnica interna, 1 foglio, Roma Capitale, Ufficio Extradipartimentale Politiche Della Sicurezza e Protezione Civile, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica, Dipartimento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana, Roma.

VENTRIGLIA U. (1971), *Cavità sotterranee*, 1 foglio, scala 1:20.000, in: *La Geologia della città di Roma*, Amministrazione Provinciale di Roma, pagg. 417, Roma.

VENTRIGLIA U. (2002), *Carta delle cavità sotterranee*, 1 foglio, scala 1:20.000, in: *Geologia del territorio del Comune di Roma*, Amministrazione Provinciale di Roma, pagg. 809, Roma.

Iconografia di una ricostruzione: l'esempio di Bisaccia (Avellino) dopo il terremoto del 23 novembre 1980

Efisio Spiga
Geologo, Avellino
E-mail: spiga.efisio@gmail.com

Sabina Porfido
CNR - I.S.A., Avellino
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli
E-mail: sabina.porfido@isa.cnr.it

Iconography of a reconstruction: the example of Bisaccia (Avellino) after the November 23, 1980 earthquake

Parole chiave: Ricostruzione, resilienza, iconografia, memoria storica
Key words: Rebuilding, resilience, iconography, historical data

La ricostruzione di un paese dopo un evento disastroso come un terremoto è sempre un fatto molto complesso, in cui troppe variabili entrano in gioco rendendo il percorso sempre poco lineare e l'obiettivo non sempre raggiungibile. Ai fattori politici, sempre predominanti, vanno aggiunti quelli tecnici, quelli amministrativi, burocratici, sociali ed economici. Esaminare nel dettaglio le ricostruzioni diventa così molto difficile e dare delle risposte adeguate impossibile (Porfido & Spiga, 2022). Il caso della ricostruzione di Bisaccia dopo il terremoto del 23 novembre 1980 ricade in quest'ambito, ricostruzione resa maggiormente complicata anche dalle caratteristiche geologiche del luogo su cui è edificato (Porfido *et al.*, 2021). La storia socio-economica ed urbana di Bisaccia, piccolo paese in provincia di Avellino, situato a 860 m s.l.m., è fortemente connessa al dissesto idrogeologico, derivante dalla intrinseca natura geologica del territorio ed agli effetti distruttivi di forti eventi sismici.

Bisaccia vanta un ricco ed interessante passato storico-archeologico che fa risalire le prime testimonianze all'età dell'eneolitico con il ritrovamento di numerosi reperti nel suo territorio comprendenti anche una necropoli del IX-VIII secolo a.C. ed i cui resti più importanti sono conservati nel locale museo civico-archeologico, all'età tardo-romana si riferiscono, invece, i resti di una villa rurale e di un santuario, scoperti in località Oscata. Il centro storico ha origine in età longobarda testimoniato dalle strutture murarie nei pressi della torre quadrangolare del locale castello ducale. La cattedrale di epoca normanna è stata ricostruita più volte a seguito dei danneggiamenti dei terremoti, l'ultima

volta nel 1747 (<https://www.museobisaccia.it/bisaccia.aspx>).

Di fatto, oggi esistono due località che rappresentano Bisaccia (Fig. 1): il vecchio e antico paese con impianto

medievale recuperato intorno al castello ducale ed alla cattedrale (Fig. 2) e la nuova Bisaccia del "Piano di Zona" quale risultato dell'intreccio delle vicitudini legate alla ricostruzione post

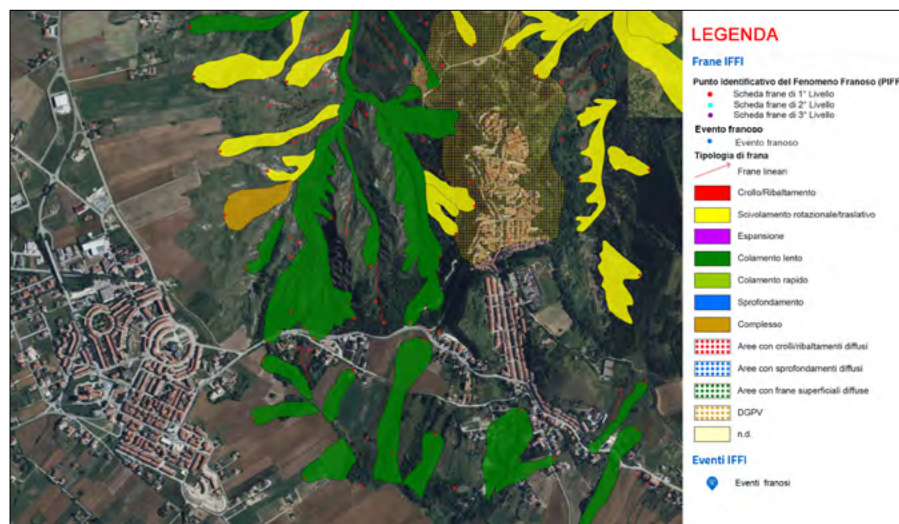


Figura 1. A destra l'antico borgo di Bisaccia circondato da numerosi fenomeni gravitativi di varia natura, a sinistra Bisaccia nuova del Piano di Zona disegnata dall'architetto Aldo Loris Rossi



Figura 2. Panoramica dell'antico centro di Bisaccia, al centro spicca la torre del castello ducale ed in primo piano la formazione delle Argille Varicolori (Foto Spiga-Porfido, 2022)



Figura 3. Particolare del centro storico di Bisaccia, in alto parte del castello ducale (Foto Spiga-Porfido, 2022)

1980 sulla base del piano urbanistico redatto dall'architetto Aldo Loris Rossi (Fig. 3), docente dell'Università Federico II di Napoli, originario di Bisaccia

(Spiga & Porfido, 2020). Lo scopo di questo lavoro è ripercorrere l'evoluzione urbanistica del paese attraverso un'analisi ad ampio spettro che compren-



Figura 4. Bisaccia vecchia: la Cattedrale dedicata alla Natività della Vergine Maria, poco distante dal castello ducale (Foto Spiga-Porfido, 2022)



Figura 5. Bisaccia nuova: Particolare del nuovo insediamento urbano redatto dall'Architetto Aldo Loris Rossi, realizzato dopo il sisma del 23 novembre 1980 (Foto tratta dal libro Bisaccia "Piano di Zona". Spiga-Porfido, 2020)

de sia una ricca bibliografia a carattere scientifico, sia una raccolta iconografica che dà conto dell'abbandono, di ciò che resta e della ricostruzione effettuata negli ultimi quarant'anni, tenendo conto delle problematiche connesse alle aree interne appenniniche e del loro sviluppo socio-economico (Gizzi & Potenza, 2020; Porfido *et al.*, 2020; Porfido & Spiga, 2020 a, b; Festa *et al.*, 2020; Piccone, 2020; Lombardi, 2021)

BISACCIA TRA TERREMOTI E DISSESTI IDROGEOLOGICI

Dal punto di vista geologico Bisaccia è caratterizzata da un piastrone costituito da conglomerati poligenici del Pliocene, leggermente cementati, poggianti sulla formazione delle "Argille Varicolori", interessate da estesi fenomeni franosi di varie tipologie, verificatisi anche nel corso dei secoli (Esposito *et al.*, 1998; Esposito *et al.*, 2000; Fiorillo *et al.*, 1996; Parise & Wasowski, 1999; AVI-GNDICI). Nella Fig. 1 sono visibili differenti fenomeni gravitativi che includono gli estesi fenomeni di scivolamento rotazionale/traslato (in giallo), i colamenti lenti che interessano soprattutto la formazione delle Argille Varicolori (verde scuro), nonché l'esteso fenomeno di Deformazione Gravitativa Profonda di Versante (DGPV) che interessa tutto il centro abitato antico e la zona settentrionale (puntinato arancione), così come riportato attualmente dalla nuova piattaforma IDROGEO dell'Ispra (<https://idrogeo.isprambiente.it/app/>)

Movimenti gravitativi che non a caso sono stati riattivati ed ampliati anche a seguito dei numerosi eventi sismici che hanno avuto come zona epicentrale l'Appennino meridionale. Il paese è situato in zona sismica, classificato nella I categoria sismica con DGR Campania n. 5447 del 7.11.2002, è stato duramente colpito dai terremoti del 1158, 1349, 1456, 1694, 1732, 1930 e 1980, così come riportato dal sito istituzionale del Comune (<http://bisaccia.asmenet.it/index.php?action=index&p=10208>).

Tra i terremoti più forti che hanno colpito Bisaccia con livello di danneggiamento elevato $I \geq VIII$ MCS, e di cui si hanno dettagliate informazioni, ricordiamo soprattutto l'evento che ebbe come zona epicentrale l'Irpinia e la Basilicata nel 1694, nonché i terremoti con epicentro in Irpinia avvenuti nel 1732 e nel 1930, ed infine quello che sconvolse l'Irpinia e la Basilicata nel 1980 (Postpischl *et al.* 1985; Esposito *et al.* 1998; Esposito & Porfido, 2011;



Figura 6. Bisaccia nuova: La Chiesa del Sacro Cuore di Gesù Vita e Risurrezione Nostra, nel nuovo insediamento urbano realizzato dopo il sisma del 23 novembre 1980 (Foto Spiga-Porfido, 2022)

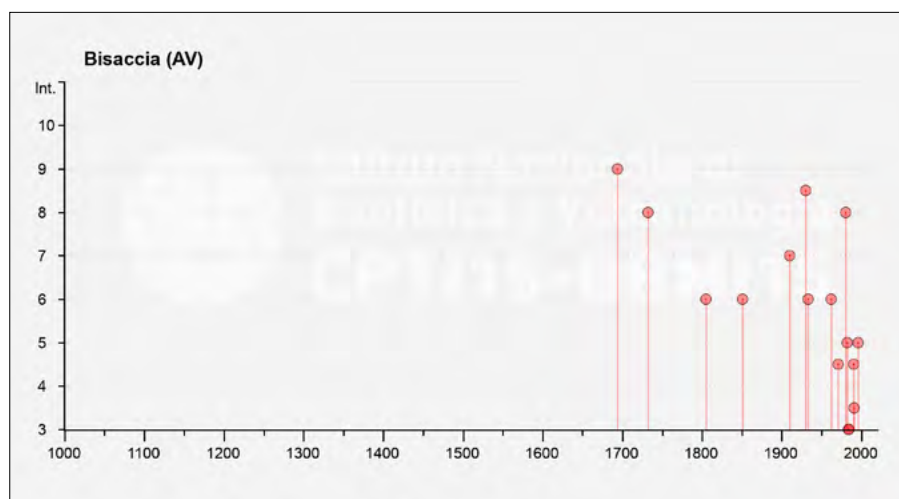


Figura 7. La storia sismica di Bisaccia (AV), riportata dai cataloghi sismici dell'INGV, evidenzia livelli di danneggiamento elevati con intensità \geq VIII MCS a seguito dei forti terremoti appenninici, avvenuti nel 1694, 1732, 1930 e 1980 (da Rovida et al., 2022)

Rovida et al. 2016; Porfido et al., 2021; Rovida et al., 2022) Fig 7.

Nel 1694 la Campania e la Basilicata furono colpite violentemente da un terremoto (I_0 = XMCS; $M=6,7$), Bisaccia fu quasi completamente distrutta con un livello di danneggiamento pari al IX grado MCS con 8 morti e numerosi feriti. Crollarono circa 200 abitazioni e varie chiese: furono gravemente danneggiati e subirono crolli parziali la cattedrale, il palazzo vescovile, danneggiato anche il monastero dei Minori Conventuali. Il terremoto innescò fenomeni franosi e fratturazioni nel suolo (Serva et al., 2007; Esposito, Porfido, 2010;

Rovida et al., 2022). Gravi danni subì il patrimonio edilizio (VIII grado MCS) anche a seguito del terremoto irpino del 1732 (I_0 = X-XI MCS; $M=6,7$) "la chiesa madre, e quindici case sono in tutto cadute; e la chiesa, e convento di S. Francesco, e le restanti case rese inabitabili, però un solo vi è morto..." (Anonimo, 1733), meno gravi, invece, furono i danni a seguito dell'evento che colpì soprattutto l'area del Vulture nel 1851 (I_0 = XMCS; $M=6,5$). Nel XX secolo, Bisaccia risentì degli effetti degli eventi sismici, tra questi i terremoti a più elevata energia avvenuti nel 1930 (I_0 = XMCS; $M=6,6$) e nel 1980 (I_0 = XMCS; $M=6,9$), i quali

oltre a produrre un notevole grado di danneggiamento, rispettivamente di I=VIII-IX e I=VIII MCS, contribuirono all'ampliamento ed al propagarsi di estesi fenomeni franosi preesistenti (Alfano, 1931; Galli et al., 2002; Esposito, Porfido, 2010; Porfido et al., 2020). Entrambi i terremoti provocarono effetti ambientali notevoli: si osservarono, infatti in alcune zone del paese numerose e profonde fratture che interessarono anche la rete viaria con lo sviluppo di dislivelli di alcune decine di centimetri, aggravando di fatto le già precarie condizioni di instabilità dei ripidi versanti che bordano il paese (Esposito, Porfido, 2010).

Il terremoto del 23 luglio 1930 provocò il crollo di 150 abitazioni e 1400 furono quelle lesionate, le vittime furono 18 e numerosi i feriti. I danni maggiori furono osservati nella zona orientale del paese come riporta la Gazzetta Ufficiale del Regno d'Italia (1930): "Bisaccia - Tutta la zona orientale in frana, che comprende i rioni Piazza, in parte, Campanile Vecchio, Rupe Andreone e S. Chirico. Tale zona è delimitata sulla sinistra della linea d'impiuvio da via Campanile Vecchio, contorno esterno dei mappali 456, 462, 163, 470, 485, largo Santoro, vicolo Vescovado Vecchio, largo Piazza, tratto di via dei Fiori fino al mappale 629 escluso, linea esterna dei mappali, 620, 610, 530, 527, 830, 324, 299, 317, 298, 282; primo



Figura 8. Bisaccia (AV): panoramica delle casette asismiche costruite dal governo fascista dopo il terremoto del 23 luglio 1930, alcune delle quali attualmente restaurate ed abitate (Foto Spiga-Porfido, 2022)



Figura 9. Bisaccia (AV): particolare delle casette asismiche costruite dal governo fascista dopo il terremoto del 23 luglio 1930, alcune delle quali ristrutturare ed abitate tutt'oggi (Foto Spiga-Porfido, 2022)



Figura 10. Bisaccia (AV): particolare delle casette asismiche costruite dal governo fascista dopo il terremoto del 23 luglio 1930, oggi abbandonate (Foto Spiga-Porfido, 2022)

tratto della via Rupe Andreone fino alla stradetta a valle dei mappali 261 e 264, linea esterna del mappale 210 fino all'orto del Convento".

A seguito del sisma del 1930, proprio a causa dei numerosi dissesti idrogeologici e del conseguente elevato livello di danneggiamento provocato al tessu-

to urbano, fu deciso il trasferimento del paese in località Boscazzulo-Cappella, situata a circa 1,5 km ad ovest del centro urbano. Tale trasferimento, però avvenne effettivamente solo dopo il terremoto del 1980, nonostante Bisaccia, fosse stata nel frattempo, più volte interessata da altri fenomeni gravitativi, come ad

esempio, quello avvenuto all'inizio del 1965, che comportò anche lo sgombero di numerosi edifici (Gizzi, Masini 2011).

Il governo fascista dell'epoca, per la ricostruzione dei paesi maggiormente danneggiati (Aquilonia, Scampitella, Villanova del Battista, Lacedonia, Vallesaccarda, Anzano di Puglia, Ariano Irpino, Melfi, Montecalvo Irpino, Barile, Bisaccia, Castel Baronia, Flumeri, etc), optò per la costruzione delle cosiddette "casette asismiche", casette di pochi metri quadrati realizzate su uno zoccolo di calcestruzzo cementizio e costituite da uno, due o più vani, oltre a cucina e servizi igienici, in prevalenza localizzati in aree poco distanti dagli antichi nuclei abitativi (Castanetto, Sebastiano, 2002; Gizzi, Masini 2011). Anche a Bisaccia furono costruite numerose casette asismiche, alcune delle quali, a distanza di ben 92 anni dal terremoto, sono ancora riconoscibili e utilizzate, oltre la memoria storica, come abitazioni Figg. 8,9,10 come d'altra parte anche nelle limitrofe località di Aquilonia, Scampitella, Trevico, Villanova del Battista e Carife (Spiga, Porfido 2020b).

Il terremoto del 1980, il più forte evento sismico avvenuto in Italia negli ultimi cento anni diventa di fatto, lo strumento politico-amministrativo per la ricostruzione del paese, infatti il sisma pur avendo prodotto danni non estremamente rilevanti al patrimonio abitativo, valutati con l'VIII grado MCS, evidenziò ancora una volta le condizioni di estrema instabilità dei bordi esterni del piastrone conglomerato, su cui è edificato la gran parte del centro storico. Instabilità accertata e documentata all'epoca del sisma, dalle numerose relazioni tecniche ad opera di gruppi di geologi ed ingegneri, tra le quali quelle redatte da accademici dell'Università di Ancona e dell'Università di Napoli, dalle quali emerse ancora una volta che una parte del paese doveva essere delocalizzato: "Una scelta diversa dal trasferimento di parte del centro storico di Bisaccia in altra zona significa, secondo il parere degli scriventi, procrastinare ad altra data il grave problema di Bisaccia che si trascina ormai da molti decenni. Sarebbe veramente illogico non tenere conto dei gravi rischi cui è soggetta la popolazione, sia dal punto di vista della franosità che della sismicità. A meno che non si voglia aspettare che nei prossimi decenni, una catastrofe delle dimensioni di quelle che di recente hanno colpito ad esempio i paesi di Conza, Lioni, Pescopagano ecc. non chiuda definitivamente e tragicamente l'argomento.

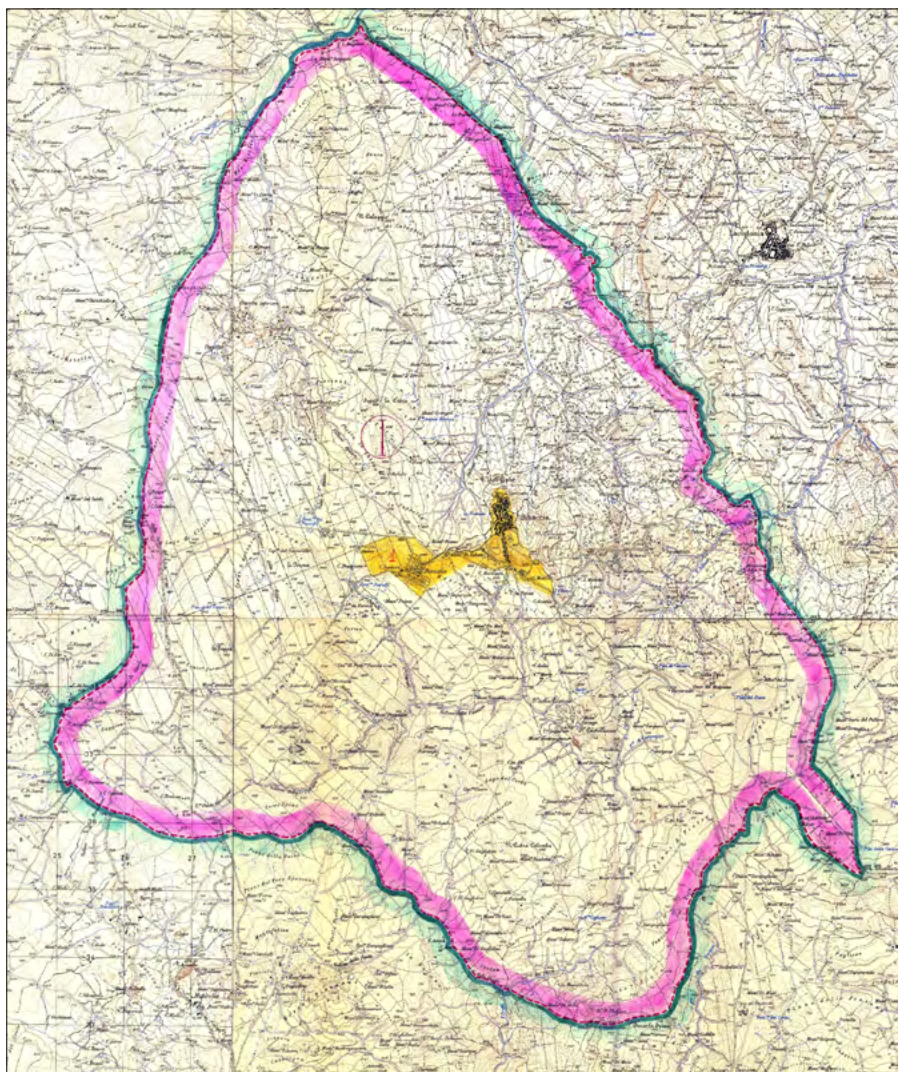


Figura 11. Carta storica del vincolo idrogeologico del Comune di Bisaccia. In verde la delimitazione del territorio comunale coincidente con la fascia fucsia delimitante l'area sottoposta a vincolo idrogeologico (R.D. n. 3267 del 1923)

U. Crescenti, T. Nanni, A. Praturlon, D. Tomassoni dell'Ist. di Geologia applicata di Ancona 30/12/1980". Non a caso la carta storica (Fig. 11) mette in evidenza che tutto il territorio era sottoposto a vincolo idrogeologico (Regio Decreto-Legge 30.12.1923. n.3267).

Le varie amministrazioni comunali succedutesi nel post-terremoto, optarono quindi per la ricostruzione del paese nella località di Boscazzulo-Cappella, già individuata a seguito del terremoto

del 1930, più stabile dal punto di vista geologico, chiamata "Piano di Zona".

La nuova Bisaccia del Piano di Zona, quasi completamente costruita secondo il piano urbanistico redatto dall'architetto Aldo Loris Rossi dell'Università di Napoli originario di Bisaccia, è un impianto architettonico particolare, "visionario", che riporta ad una città utopica, futuribile, dove prevale il cemento armato, che non ha riscosso il consenso della popolazione, ma che è la testimonianza

netta, decisa del cambiamento post disastro (si potrebbe paragonare ad una moderna Cerreto Sannita, distrutta dal terremoto del 1688 e ricostruita a valle con un impianto architettonico regolare, ancora oggi funzionale per le caratteristiche antisismiche (Spiga, Porfido, 2022; Porfido *et al.*, 2023) Figg. 5-6. È in questa ricostruzione post terremoto che s'inserisce anche il piano insediativo delle case popolari (IACP), sempre progettate da Aldo Loris Rossi, costituite da strutture moderne ma poco funzionali, sovradimensionate rispetto al reale fabbisogno, che vedrà il completamento definitivo forse quest'anno. Una vicenda lunga ormai più di quarant'anni che ebbe inizio nel 1981 con il finanziamento di ben 83 alloggi popolari, poi ridotti a 79 nel 1987, con successive modifiche che negli anni li riducono ulteriormente. Finalmente nel 2014 fu approvato il progetto definitivo che prevedeva la riqualificazione urbana ed edilizia di soli 18 alloggi (<http://www.iacpav.it/upload/progint/25052009132123Relazione%20sintetica%20descrittiva%20Programma%20Riqualificazione%20Bisaccia.pdf>).

Una storia burocratica e tecnico-amministrativa che equivale ad una moderna odissea, testimoniata dalle immagini che proponiamo, in cui gli enormi cumuli di macerie mettono a nudo ancora una volta il fallimento politico e sociale della ricostruzione Fig. 12-15 (Porfido S. & Spiga E. (2022).

CONCLUSIONI

L'iconografia della ricostruzione di Bisaccia post 1980, presentata in questo lavoro, evidenzia sia pur in maniera estremamente sintetica, quanto e quale sia stata fino ad oggi l'influenza dei terremoti e del dissesto idrogeologico sullo sviluppo urbano della comunità. Fenomeni che hanno inciso fortemente e drammaticamente sulla scelta



Figura 12. Bisaccia Nuova (AV): particolare del "Piano di Zona" con le case popolari costruite dopo il 1980 in via di smantellamento (Foto tratta dal libro *The Bisaccia IACP* 2022)



Figura 13. Bisaccia Nuova (AV): particolare del "Piano di Zona" con la porta d'ingresso alle nuove case popolari ricostruite/recuperate (IACP - Foto Spiga-Porfido, 2022)



Figura 14. Bisaccia Nuova (AV): particolare del "Piano di Zona" con le case popolari in via di ultimazione (IACP - Foto Spiga-Porfido, 2022)



Figura 15. Bisaccia Nuova (AV): particolare del "Piano di Zona" con le case popolari quasi ultimate (IACP - Foto Spiga-Porfido, 2022)

di delocalizzazione del paese, ma che solo grazie al senso di resilienza degli abitanti hanno permesso comunque la coesistenza di due Bisaccia: da una parte il vecchio centro urbano, ricco di storia con la Cattedrale, il Castello Ducale che ospita anche un prezioso museo civico archeologico, e dall'altra il nuovo centro moderno, non ancora apprezzato appieno dalle comunità locali, espressione di un progetto visionario e utopico dell'architetto Aldo Loris Rossi, che ha visto la realizzazione in tempi lunghissimi, non auspicabili per nessuna comunità che dovrebbe avere la possibilità di "rivivere" degnamente in tempi brevi dopo una catastrofe. Un valore aggiunto, potremmo definire la coesistenza di queste due realtà, che però andrebbero valorizzate con pari dignità, esaltate e portate alla ribalta, creando verosimilmente le condizioni per quei percorsi di turismo "sostenibile" di cui tanto si parla, ma di cui manca l'attuazione concreta.

La panoramica che abbiamo voluto offrire, non può considerarsi certo esaustiva, ma le immagini fotografiche proposte, volutamente della ricostruzione e non del danneggiamento, hanno l'obiettivo di guidare il lettore ad intravedere lo sviluppo urbano dei paesi, nell'ottica della salvaguardia del territorio e del patrimonio culturale. Ancor più, documentare il processo di ricostruzione, rivelando l'eredità umana al paesaggio naturale, e la nostra capacità, o il fallimento, di interpretare correttamente il destino ambientale di un luogo.

BIBLIOGRAFIA

- ALFANO G.B. (1931), *Il terremoto irpino del 23 luglio 1930* (Pubblicazione dell'Osservatorio di Pompei), Pompei, 1931.
- ANONIMO (1733), *Distinta relazione del danno cagionato dal tremuoto del dì 29. novembre 1732. in tutta la provincia di Montefusco, o sia Principato ulteriore, col numero de' morti, e feriti in ciascuna comunità della medesima provincia*. Napoli
- DECRETO GIUNTA REGIONALE CAMPANIA n. 5447 del 7.11.2002.
- ESPOSITO E., PORFIDO S., IACCARINO G., TRANFAGLIA G. (2000), *Terremoti e centri storici dell'Irpinia: gli effetti del terremoto del 1930*. Proc. GeoBen 2000, CNR, 2133, 477-484.
- ESPOSITO E., GARGIULO A., IACCARINO G., PORFIDO S. (1998), *Distribuzione dei fenomeni franosi riattivati dai terremoti dell'Appennino meridionale. Censimento delle frane del terremoto del 1980*, in Proc. Inter. Conv. on Prevention of Hydrogeological Hazards, CNR(IRPI): Torino, Italy, p. 409-429.
- FESTA G., IULIANO G., SAGGESE P. (2021) *Irpinia-1980-2020*; Delta 3Edizioni; p. 312. ISBN 978-88-6436-860-3.
- FIORILLO F., PARISE M., WASOWSKI J. (1996), *Slope instability in the Bisaccia area (Southern Apennines, Italy)*. Proc. 7th Int. Symp. on Landslides (Trondheim) 2, 965-970
- GALLI P., MOLIN D., GALADINI F., GIACCIO B. (2002), *Aspetti sismotettonici del terremoto irpino del 1930*. In: S. CASTENETTO E M. SEBASTIANO (eds.), *Il "terremoto del Vulture" 23 luglio 1930, VIII dell'Era fascista*. Roma, 217-262.
- GAZZETTA UFFICIALE DEL REGNO D'ITALIA (1930).
- GIZZI F. T., MASINI N. (2011), *Dalle fonti all'evento. Percorsi, strumenti e metodi per l'analisi del terremoto del 23 luglio 1930 nell'area del Vulture*. ISBN: 8849520506
- GIZZI F.T., POTENZA M.R. (2020) *The Scientific Landscape of November 23rd, 1980 Irpinia-Basilicata Earthquake: Taking Stock of (Almost) 40 Years of Studies*. Geosciences, 10, 482.
- GUARINO M. (2009-2011), *Verso una nuova qualità dell'abitare: la riqualificazione dell'edilizia residenziale pubblica*. Tesi di dottorato. Università degli studi di Salerno. <http://hdl.handle.net/10556/15>
- LOMBARDI G. (2021) *Irpinia Earthquake and History: A Nexus as a Problem*. Geosciences, 11, 50. <https://doi.org/10.3390/geosciences11020050>
- PARISE, M., WASOWSKI J. (1999), *Landslide Activity Maps for Landslide Hazard Evaluation: Three Case Studies from Southern Italy*. Natural Hazards 20, 159-183 <https://doi.org/10.1023/A:1008045127240>
- PICONE G. (2020), *Paesaggio Con Rovine*; Ed. Mondadori: Milano, Italy, p. 226. ISBN 978-88-04-72480-3
- PORFIDO S., ALESSIO G., GAUDIOSI G., NAPPI R., MICHETTI A. M., SPIGA E. (2021), *Photographic Reportage on the Rebuilding after the Irpinia-Basilicata 1980 Earthquake (Southern Italy)*, Geosciences, 11, 6, doi: 10.3390/geosciences11010006
- PORFIDO S., ALESSIO G., GAUDIOSI G., NAPPI R., SPIGA E. (2023), *Il terremoto irpino-lucano del 23 novembre 1980. Quaranta anni dopo: paesi ricostruiti dove e come*. Atti Conv. RECAP (In press).
- PORFIDO S., SPIGA E. (2020), *Ricostruzione 1980-2020* Ed; Blurb: San Francisco, CA, USA, 2020; Volume I.
- PORFIDO S., SPIGA E. (2020), *Ricostruzione 1980-2020* Ed; Blurb: San Francisco, CA, USA, 2022- ISBN 978-1-71-572142-8.
- PORFIDO S., SPIGA E. (2022), *The Bisaccia IACP*; Blurb: San Francisco, CA, USA, ISBN 979-8-1-21-063153-4
- Postpischl D., Branno A., Esposito E., Ferrari G., Marturano A., Porfido S., Rinaldis V., Stucchi M. (1985), *The Irpinia earthquake of November 23, 1980, in Atlas of Isoseismal Maps of Italian Earthquakes*, Bologna, Italy, 1; 114, 2A, p. 152-157
- Regio Decreto-Legge 30.12.1923. n.3267
- ROVIDA A., LOCATI M., CAMASSI R., LOLLI B., GASPERINI P., ANTONUCCI A. (2022), *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/CPTI/CPTI15.4>
- SERVA L., ESPOSITO E., GUERRIERI L., PORFIDO S., VITTORI E., COMERCI V. (2007), *Environmental Effects from some historical earthquakes in Southern Apennines (Italy) and macroseismic intensity assessment. Contribution to INQUA EEE scale project*. Quaternary International, 173-174, 2007, p. 30-44
- SPIGA E. & PORFIDO S. (2020a), *Bisaccia Piano di Zona*, Blurb ed., San Francisco, CA, USA, ISBN 978-1-71-555296-1.
- SPIGA E. & PORFIDO S. (2020b), *Via Casette asismiche*, Blurb ed., San Francisco, CA, USA, ISBN 978-1-71-463873-4.

SITOGRAFIA

- http://www.wdb.gndci.cnr.it/php2/avi/frane_comune.php?lingua=it (ultimo accesso gennaio 2023)
- <https://idrogeo.isprambiente.it/app/> (ultimo accesso gennaio 2023)
- <http://bisaccia.asmenet.it/index.php?action=index&p=10208>
- (<http://www.iacpav.it/upload/progint/25052009132123Relazione%20sintetica%20descrittiva%20Programma%20Riqualificazione%20Bisaccia.pdf>).

La nuova carta delle cavità sotterranee del territorio del Municipio Roma V (Roma Capitale)

A new map of the artificial underground cavities located in the Fifth Municipality of Rome

Parole chiave: Roma, cartografia, cavità sotterranee, sinkholes antropogenici
Key words: Rome, cartography, underground cavities, anthropogenic sinkholes

Claudio Succhiarelli¹, Vittorio Di Stefano²,
Gianluca Ferri³, Riccardo Paolucci⁴,
Ivano Stranieri⁵, Marilisa Raucci⁶

¹ Roma Capitale, Dipartimento Programmazione e Attuazione Urbanistica

² Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale (consulente)

³ Roma Capitale, Dipartimento Protezione Civile

⁴ Sotterranei di Roma - Ricerca a.p.s.

⁵ Roma Sotterranea S.r.l.

⁶ Roma Capitale, Servizio Civile

E-mail: claudio.succhiarelli@comune.roma.it

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito delle attività relative alla predisposizione degli interventi di messa in sicurezza connessi con i fenomeni di dissesto causati dalle cavità sotterranee di origine antropica presenti nel territorio del Municipio Roma V (Fig. 1), nel 2016 fu costituito, dall'Assessore ai Lavori Pubblici del Municipio, un *Tavolo Tecnico Interdipartimentale* specifico per avviare una nuova gestione operativa, coordinata e avanzata delle soluzioni amministrative e tecniche da approntare in merito alla problematica.

Il *Tavolo Tecnico Interdipartimentale*, attualmente coordinato dall'Assessorato ai Lavori Pubblici, è composto da geologi, ingegneri e tecnici dei Dipartimenti di Roma Capitale (Programmazione e Attuazione Urbanistica, Protezione Civile e Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana), della direzione tecnica del Municipio, di ACEA ATO 2 S.p.A. e delle associazioni speleologiche "Roma Sotterranea" S.r.l. e "Sotterranei di Roma - Ricerca a.p.s."

La gestione di questa tematica ha reso necessaria la realizzazione di un aggiornamento dei dati e delle conoscenze territoriali relative alla presenza di cavità sotterranee di origine antropica, attraverso una complessiva revisione generale delle cartografie pubblicate e delle recenti informazioni acquisite, rappresentate attraverso la redazione di una nuova *Carta delle cavità sotterranee del Municipio Roma V*.

2. FINALITÀ DELLA NUOVA CARTA

La nuova *Carta delle cavità sotterranee del Municipio Roma V* è stata ideata per le finalità relative agli adempimenti tecnico-progettuali degli Uffici e dei Dipartimenti di Roma Capitale istituzionalmente competenti, nonché per le attività di comunicazione alla cittadinanza della problematica nei rapporti istituzionali, sia con le associazioni portatori degli interessi dei cittadini che con la popolazione residente nel Municipio.

Sono quindi state realizzate due versioni della nuova *Carta*: la versione tec-

nica e la versione per la comunicazione istituzionale.

La versione tecnica è rappresentata con una vestizione grafica e distinzione dei tematismi della legenda per gli usi progettuali a scala urbana (Fig. 3), mentre la versione per la comunicazione è stata ideata ad uso della cittadinanza, al fine di rendere più leggibile i dati territoriali (Fig. 2).

Attraverso l'aggiornamento permanente delle informazioni territoriali che verranno acquisite ed elaborate dal *Tavolo Tecnico Interdipartimentale*, la nuova *Carta* potrà consentire una gestione avanzata e coordinata dei progetti da avviare sul territorio, permettendo di individuare:

- le aree in cui eseguire le indagini per identificare le zone a rischio sprofondamento, propedeutiche all'analisi e alla valutazione degli interventi di messa in sicurezza più adeguati;
- le aree dove, per probabile o accertata presenza nel sottosuolo di ipogei, richiedere le integrazioni di indagini di verifica e la loro tipologia, nell'ambito delle procedure urbanistiche relative ad autorizzazioni edilizie di progetti infrastrutturali e insediativi dove le strutture di fondazione interagiscono con il suolo e il sottosuolo;
- le aree dove programmare e pianificare le indagini di verifica e controllo con ACEA ATO 2 S.p.A. per la rilevazione di eventuali interazioni tra le infrastrutture fognarie e acquedottistiche e le sottiacenti cavità.

3. STRUTTURA E CONTENUTO TEMATICO DELLA NUOVA CARTA

La realizzazione della nuova *Carta* ha riguardato la rappresentazione della presenza di cavità sotterranee di origine antropica, cioè quegli ipogei realizzati per opera dell'uomo nelle epoche storiche passate, caratterizzati da

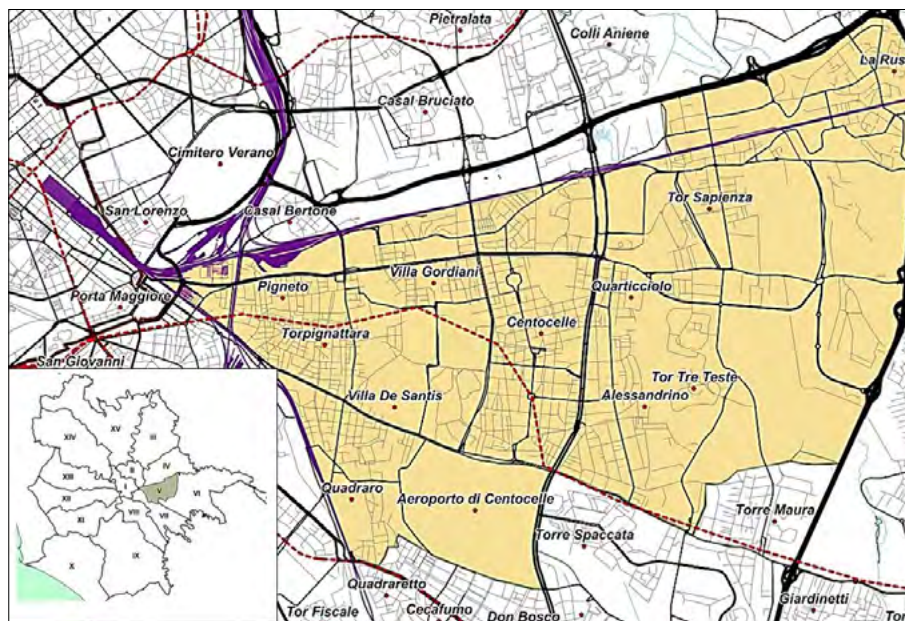


Figura 1. Localizzazione del territorio del Municipio Roma V

diverse tipologie di forme, dimensioni ed estensione, in relazione alle funzioni a cui erano adibite e alle necessità del contesto territoriale per cui sono state realizzate e, di cui, non si possiedono le dirette testimonianze originarie delle loro documentazioni storiche.

Sono stati quindi esclusi gli eventi di sprofondamento del suolo che si originano per dissesti delle reti fognarie e idropotabili, in quanto questo settore della problematica ha caratteristiche di gestione tecnica ed istituzionale differenti da quelle relative alle cavità sotterranee di origine antropica.

Le differenze riguardano principalmente le metodologie di studio, le competenze professionali e istituzionali coinvolte (rispettivamente ingegneri e tecnici di Acea ATO 2 per le reti fognarie e acquedottistiche; geologi, archeologi e tecnici degli uffici di Roma Capitale per le cavità sotterranee di origine antropica), le tipologie progettuali e le modalità di intervento di messa in sicurezza.

La realizzazione della nuova *Carta* (Fig. 3) è stata strutturata in 4 punti fondamentali:

- raccolta e rappresentazione dei dati cartografici fino ad ora pubblicati, integrati dalle inedite conoscenze acquisite sulle cavità sotterranee di origine antropica;
- costante aggiornamento dei dati provenienti dalle segnalazioni per-

venute alla Sala Operativa del Dipartimento Protezione Civile di Roma Capitale, da informazioni della cittadinanza e da pubblicazioni scientifiche e cronachistiche;

- verifica della localizzazione delle planimetrie e degli elementi puntuali dei dati rappresentati che riportano le segnalazioni delle cavità riscontrate;
- definizione delle relative fonti di origine dei dati rappresentati.

La struttura delle informazioni della legenda è stata articolata per elementi areali e puntuali di rappresentazione, in relazione alla presenza accertata e/o alla probabilità di esistenza delle cavità sotterranee.

Le aree perimetrate interessate da cavità sotterranee accertate, sono state distinte tramite la loro tipologia di individuazione, in:

- rilievi strumentali speleotopografici diretti;
- esplorazioni dirette;
- indagini televisive in foro;
- testimonianze documentali scritte e grafiche, sia tecniche che storiche.

Le aree perimetrate interessate da cavità sotterranee accertate, tramite rilievi strumentali speleotopografici diretti, hanno riguardato le zone, qui di seguito riportate, con il relativo riferimento numerico identificativo nella cartografia e la fonte originaria del dato:

- R01 Villa De Sanctis 1 (Roma Sotterranea S.r.l.);
 - R02 Villa De Sanctis 2 (Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento Scienze della Terra, Centro di Ricerca C.E.R.I., 2011);
 - R03 Via dei Gordiani (Comune di Roma, Geosonda – Italconsult, 1981);
 - R04 Quadraro - Via Igino (Sotterranei di Roma – Ricerca a.p.s.);
 - R05 Quadraro - Via Columella - via Cincinnato (Sotterranei di Roma – Ricerca a.p.s.);
 - R06 Via Teano - via Formia (Comune di Roma, Geosonda – Italconsult, 1981);
 - R07 Aeroporto di Centocelle (Roma Sotterranea S.r.l.);
 - R08 Tor De Schiavi (Roma Sotterranea S.r.l.);
 - R09 Via Dulceri (Sotterranei di Roma – Ricerca a.p.s.);
 - R10 Via Filarete (Sotterranei di Roma – Ricerca a.p.s.);
 - R11 Via Policastro (Sotterranei di Roma – Ricerca a.p.s.);
 - R12 Via Buie d'Istria (Roma Capitale, Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e manutenzione Urbana – Società Cooperativa Lavori in Corda, 2021);
 - e le aree riportate in Nisio *et al.* (2017).
- Le aree interessate da cavità accertate tramite esplorazioni dirette, senza rilievo topografico, hanno riguardato un

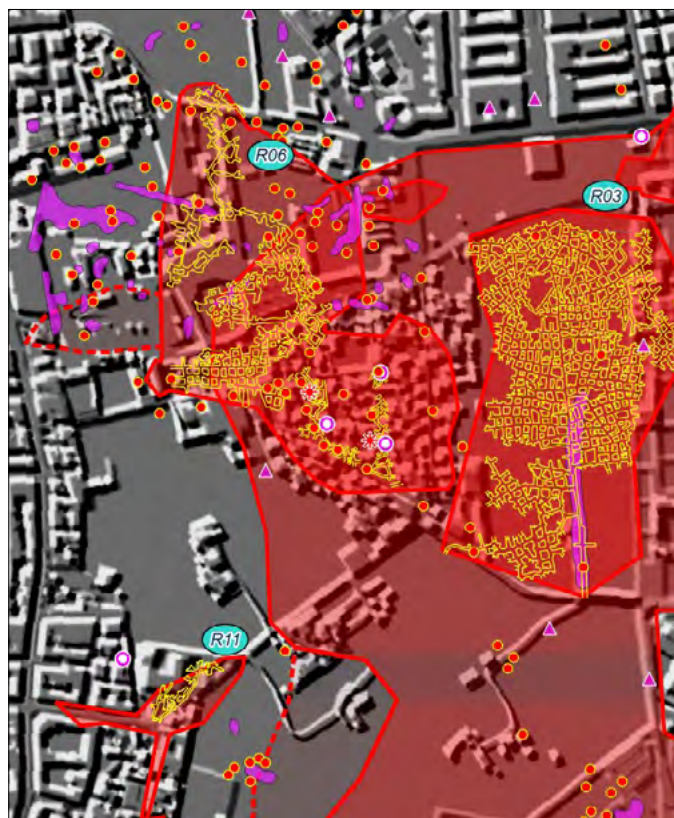


Figura 2. Stralcio della nuova Carta delle cavità sotterranee del Municipio Roma V, versione per la comunicazione, relativo alle aree urbane con cavità sotterranee di via dei Gordiani (R03), via Teano e via Formia (R06) e via Policastro (R11)



Figura 3. Stralcio cartografico della nuova Carta delle cavità sotterranee del Municipio Roma V, versione tecnica, relativo alle aree del Parco urbano di Villa De Sanctis e via dei Gordiani

insieme di zone che sono state distinte in cartografia con 2 colori in relazione alle 2 fonti dei dati di origine, corrispondenti ai gruppi speleologici di "Roma Sotterranea s.r.l." e di "Sotterranei di Roma – Ricerca a.p.s.".

Le aree interessate da cavità accertate e mappate con indagini televisive in foro si riferiscono alle zone di via Minturno – via Formia 1 e 2 (Geotecnosond, 1995) e del settore ovest del Municipio (Comune di Roma, Circoscrizione VI, Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Scienze Geologiche, 2000).

Le aree interessate da cavità accertate da testimonianze documentali, tecniche e storiche, riguardano:

- le zone con la presenza di catacombe rappresentate anche con un relativo numero di riferimento identificativo (Pontificia Commissione di Archeologia Sacra, 2000 – 2022);
- le aree adibite ad antiche attività estrattive in sotterraneo (imbocchi di cava) e a cielo aperto (Comune di Roma, Circoscrizione VI, Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Scienze Geologiche, 2000).

Le aree perimetrate con probabile presenza di cavità sono state distinte in 5 tipologie in funzione delle indicazioni geologiche e geomorfologiche dirette e indirette, integrate da valutazioni tecniche (Comune di Roma, Dipartimento X, Ufficio Servizio Giardini e Protezione civile - Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade, 2001) e da dati cartografici (Nisio *et al.*, 2017).

Gli elementi puntuali che rappresentano l'individuazione della presenza di cavità, sono stati rappresentati in legenda tramite l'acquisizione dei dati provenienti da pubblicazioni cartografiche e tecniche, in 8 tematismi:

- segnalazione di cavità elaborate da testimonianze documentali (Comune di Roma, Circoscrizione VI, Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Scienze Geologiche, 2000);
- cavità riscontrate in sondaggio (Ventriglia, 2002, CNR – ICAG, documentazione tecnica; rappresentate in Nisio *et al.*, 2017);
- accessi di cava passati e recenti sulla base di indizi morfologici costituiti prevalentemente da dissesti naturali per voragini, e subordinatamente, da imbocchi artificiali di ingresso al loro interno, individuati da ricerche cartografiche (Nisio *et al.*, 2017);
- cunicoli e/o cavità isolate (Comune di Roma, Dipartimento X, Ufficio Servizio Giardini e Protezione civile

- - Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade, 2001);
- ipogei isolati (Nisio *et al.*, 2017);
- cavità adibite a bunker e/o rifugio durante la II guerra mondiale (Nisio *et al.*, 2017);
- voragini del piano campagna o stradale (sinkholes) per crollo di cavità sotterranee (Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, Progetto Sinkholes, 2007; in fase di aggiornamento a cura del *Tavolo Tecnico Interdipartimentale* del Municipio Roma V);
- dissesti significativi rilevati delle volte delle cavità (avvenuti o in stato incipiente) che non hanno interessato la superficie urbanizzata esterna (Comune di Roma, Circoscrizione VI, Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Scienze Geologiche, 2000).

Gli elementi territoriali naturali e antropici sono stati rappresentati tramite acquisizione dalla Carta Tecnica Regionale del Lazio (2014). Sono riportati il reticolo idrografico, gli invasi e gli specchi lacustri, il sistema urbano (edificato) con edifici, manufatti industriali, argini, muri divisorii o di sostegno e, infine, le infrastrutture stradali e ferroviarie.

4. CONCLUSIONI

La realizzazione della nuova *Carta* fornisce un importante contributo aggiornato per la conoscenza e la sicurezza delle attività territoriali, consentendo una gestione avanzata degli interventi urbanistici infrastrutturali e insediativi, per i progetti delle opere di manutenzione urbana e per l'aggiornamento del Piano di Emergenza di Protezione Civile.

In particolare essa fornisce le informazioni tecniche di base che contribuiscono alla definizione delle tipologie di indagine da prescrivere nei procedimenti autorizzativi per la realizzazione di opere sia pubbliche che private.

La nuova *Carta* è stata realizzata anche come un importante strumento di comunicazione della conoscenza dell'interazione tra cavità sotterranee e il sistema ambientale e urbano di superficie, nella gestione delle attività di informazione e dei rapporti pubblici tra le strutture dell'amministrazione capitolina, la cittadinanza e le associazioni locali.

La nuova *Carta* nelle due versioni (tecnica e di comunicazione) sarà disponibile on line sul sito web del Municipio Roma V e i relativi dati potranno essere richiesti e resi disponibili in formato vettoriale.

BIBLIOGRAFIA

- COMUNE DI ROMA, GEOSONDA – ITALCONSULT (1981), *Studi e indagini geognostiche per il rilevamento delle gallerie esistenti in una zona del territorio della Circoscrizione VI*, Ripartizione V LL. PP., Planimetria dell'area campione, disegno n. 02, scala 1:1.000, Roma.
- COMUNE DI ROMA, Circoscrizione VI & Università degli Studi "Roma Tre", Dipartimento di Scienze Geologiche (2000), *Carta della presenza di cavità*, 1 foglio, scala 1:10.000 circa, in: Studio geologico preliminare inerente le problematiche di rischio di crollo di cavità nel territorio della VI Circoscrizione del Comune di Roma, Roma.
- COMUNE DI ROMA, Dipartimento X, Ufficio Servizio Giardini e Protezione Civile & Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade (contratto di ricerca, 2001, Responsabile scientifico Prof. Sciotti M.), *Il rischio cavità sotterranee nell'area del Comune di Roma*, 59 fogli, scala 1: 10.000 (con le planimetrie del rilievo di 25 catacombe e di 27 sistemi caveali originati da attività estrattive), Roma.
- GEOTECNOSOND (1995), *Indagini televisive in foro lungo via Formia, via Terracina, via Minturno e via Sezze*, Roma.
- NISIO S., ALLEVI M., CIOTOLI G., FERRI G., FIORE R., LANZINI M., ROMA M., PAOLUCCI R., STRANIERI I., SUCCHIARELLI C. (2017), *Carta delle cavità sotterranee di Roma*, 4 fogli, scala 1: 15.000, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.
- PONTIFICIA COMMISSIONE DI ARCHEOLOGIA SACRA (2000-2022), *Carta delle catacombe cristiane*, scala 1:20.000, elaborato cartografico inedito di aggiornamento, Roma.
- PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI, Dipartimento della Protezione Civile (2007), *Progetto Sinkholes*, cartografia e schede di rilevazione, Roma.
- ROMA CAPITALE, Dipartimento Coordinamento Sviluppo Infrastrutture e Manutenzione Urbana – Società Cooperativa Lavori in Corda e Albanese Perforazioni (2021), *Indagini geognostiche e strumentali di supporto alla progettazione degli interventi di completamento consolidamento cavità, edifici e aree esterne n.6,7,9,10,11 (Largo Terme Gordiane, via Pisino, via Buie d'Istria)*, Planimetria cavità, elaborato n.1, scala 1:200, Roma. (2021).
- UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA "LA SAPIENZA", Dipartimento Scienze della Terra, Centro di Ricerca C.E.R.I. (2011), *Villa De Sanctis: ubicazione del reticolo caveale e dei settori soggetti a dissesto e disposizione delle stese geoelettriche*, Convenzione: Standard metodologico di indagini geognostiche per la scelta e progettazione degli interventi di risanamento di aree soggette a rischio di crollo di cavità sotterranee nell'area urbana di Roma, cartografia, Roma.
- VENTRIGLIA U. (2002), *Carta delle cavità sotterranee*, 1 foglio, scala 1:20.000, in: *Geologia del territorio del Comune di Roma*, Amministrazione Provinciale di Roma, Roma.

Pericolosità idrologica di Torino

Hydrological hazard of Turin

Parole chiave: pericolosità idrologica, rischio di alluvione, città di Torino
Key words: hydrological hazard, flood risk, city of Turin

Battista Taboni

Università degli Studi di Torino -
Vicepresidente SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: battista.taboni@unito.it

Annalisa Bove

Geologo, Libero Professionista -
Presidente SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: annalisa.bove@geologiapiemonte.it

Gessica Umili

Università degli Studi di Torino -
Segretario SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: gessica.umili@unito.it

Luciano Masciocco

Università degli Studi di Torino -
Consigliere nazionale SIGEA-APS
E-mail: luciano.masciocco@unito.it

PREMESSA

Torino è chiamata la città dei quattro fiumi: sorta sulla sponda sinistra del F. Po, in posizione sicura dal punto di vista idrologico, si è via via estesa con l'edificazione occupando spazi di competenza fluviale non solo del Po, estendendosi anche in destra idrografica, ma anche di tre suoi affluenti di sinistra (Fig. 1), da monte verso valle: il Sangone (torrente lungo circa 47 km, con un bacino idrografico di circa 270 km²), la Dora Riparia (fiume con un bacino di 1340 km², il cui percorso si sviluppa quasi interamente nella Val di Susa) e la Stura di Lanzo (torrente lungo 68,8 km e con un bacino idrografico

ampio 836 km²). Nell'articolo si mette in evidenza come, per l'ampiezza del proprio bacino e per l'occupazione delle fasce di esondazione da parte degli edificati, il corso d'acqua più pericoloso per la Città di Torino sia la Dora Riparia.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il fiume Dora Riparia si origina sulle Alpi Cozie, dalla confluenza di due rami sorgentizi: la Piccola Dora, che nasce in territorio francese presso il colle del Monginevro, e il torrente Ripa, proveniente dalla Valle Argentera e che a sua volta riceve le acque del torrente Thurax.

Giunto presso Oulx il fiume si ingrossa notevolmente grazie all'apporto da sinistra del suo maggiore affluente d'alto corso, la Dora di Bardonecchia, scorrendo così in un ampio greto ciottoloso per poi restringersi in una stretta gola poco prima di Susa dove riceve il torrente Cenischia, ultimo tributario degno di nota. Attraversata Susa, riceve solo affluenti di scarsa importanza e prende a scorrere in direzione sud-est bagnando la cittadina di Bussoleno e tutta la bassa Valle di Susa. Giunto in pianura attraversa poi i territori dei comuni di Avigliana, Alpignano, Pianezza, Collegno e, per ultima, l'ampia area

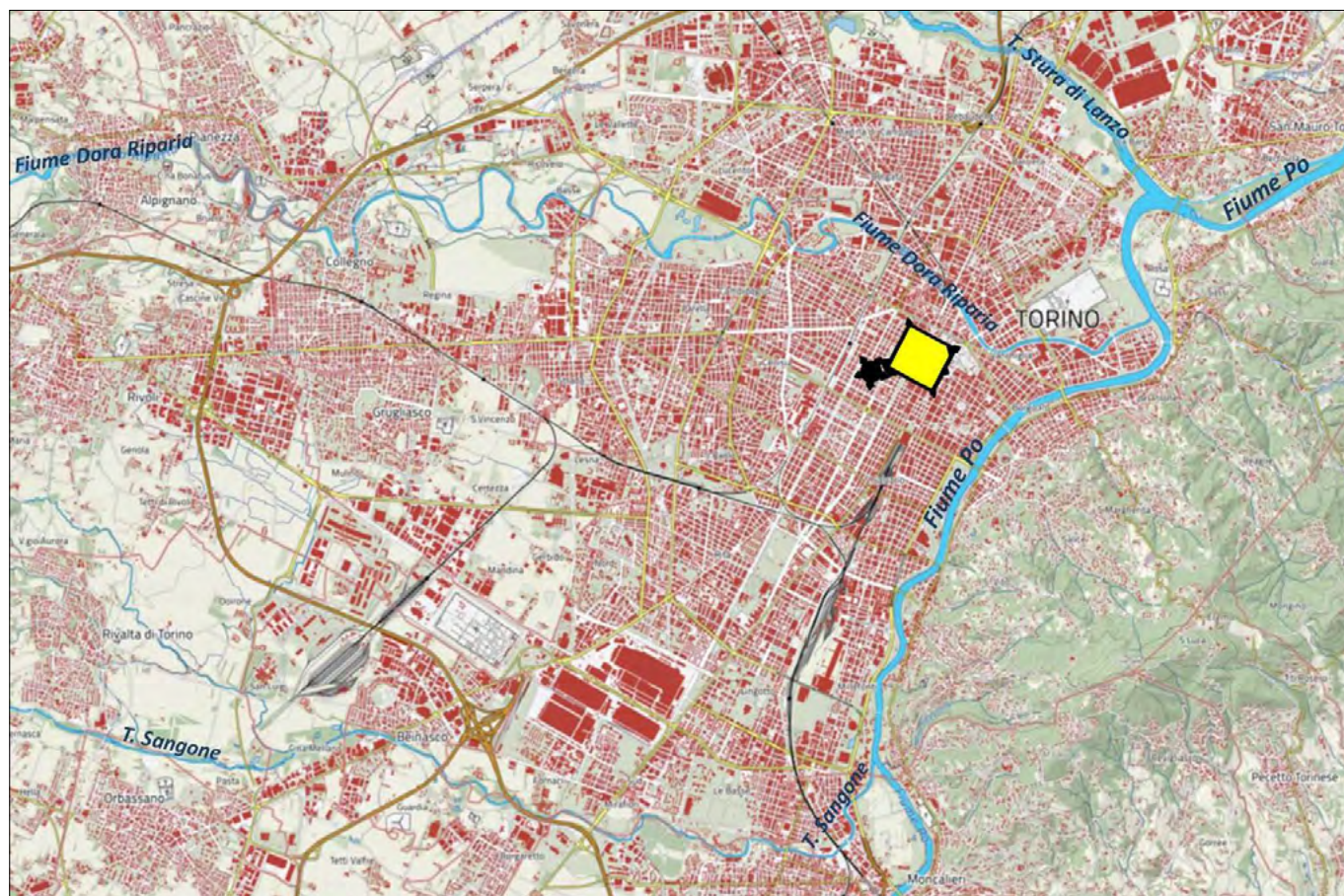


Figura 1. La città di Torino, sorta a distanza di sicurezza dal pericolo idrologico (Augusta Taurinorum in giallo, la città fortezza del sedicesimo secolo in nero) si è sconsideratamente espansa sul F. Po e sui suoi affluenti di sinistra: il T. Sangone, il F. Dora Baltea e il T. Stura di Lanzo

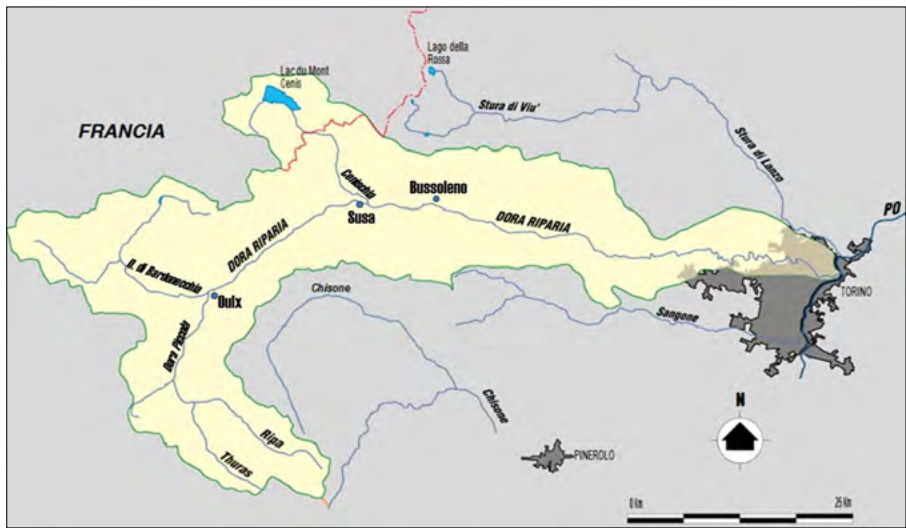


Figura 2. Dalle sorgenti della Ripa alla confluenza nel Po, la Dora Riparia misura circa 125 km. Il suo bacino idrografico si estende per 1340 km²



Figura 3. Una volta entrata in Torino, dopo aver attraversato il parco della Pellerina ed aver contornato su tre lati il perimetro dell'Ospedale "Amedeo di Savoia", la Dora Riparia continua la sua discesa nella parte nord della città, andando poi a confluire nel Po presso il Parco Colletta. I numeri segnalano le due sezioni fluviali prese in considerazione per le verifiche idrauliche. Sul Ponte Washington è ubicata la stazione idrografica "Dora Riparia a Torino"

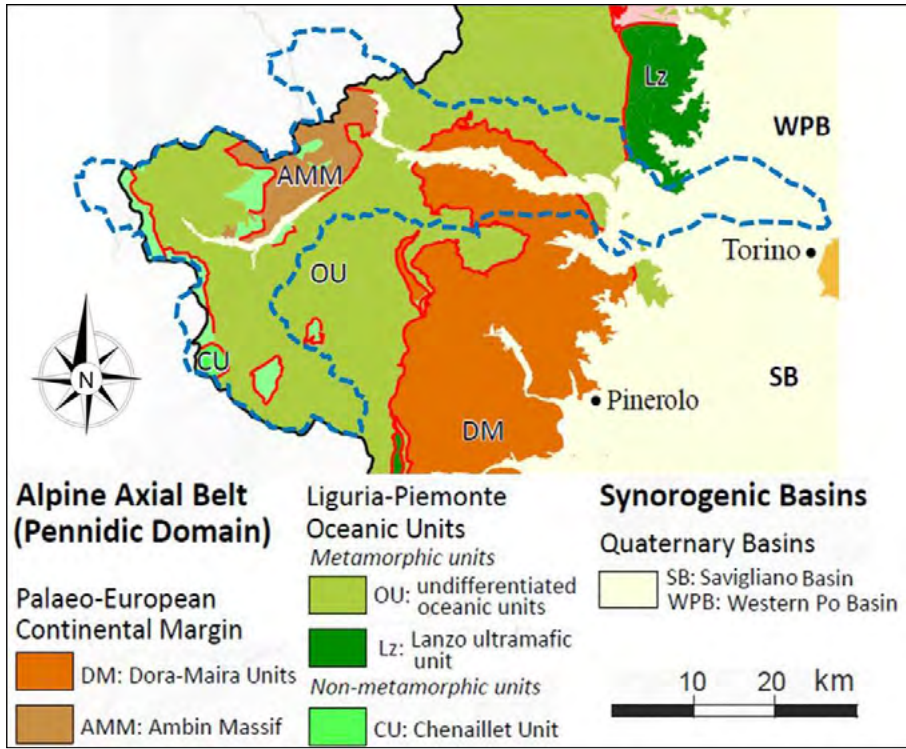


Figura 4. Inquadramento geologico del bacino della Dora Riparia (tratteggio azzurro). Da Piana et al. (2017) modificato

metropolitana di Torino (Fig. 2). Considerando l'origine alle sorgenti della Ripa, la lunghezza della Dora Riparia è di circa 125 km.

Entrando nella città di Torino, dopo aver attraversato il parco della Pellerina ed aver contornato su tre lati il perimetro dell'Ospedale "Amedeo di Savoia", la Dora Riparia continua la sua discesa nella parte nord della città, andando poi a confluire nel F. Po presso il Parco Colletta (Fig. 3).

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Come si può osservare dalla figura 4, dal punto di vista geologico, il bacino della Dora Riparia è inserito interamente nella zona assiale della catena alpina (Dominio Pennidico). Vi affiorano rocce del margine continentale paleo-europeo e in particolare le Unità del Dora Maira (DM) e del Massiccio d'Ambin (AMM) e rocce delle Unità Oceaniche Liguri Piemontesi sia metamorfiche (Unità oceaniche indifferenziate - OU e Unità ultrabasiche di Lanzo - LZ) sia non metamorfiche (Unità Chenaillet - CU). Litologicamente sono rappresentate in maggioranza le rocce silicatiche sia acide (gneiss e micascisti) sia basiche e ultrabasiche (pietre verdi delle unità oceaniche), in minor misura le rocce miste (calcescisti) e sporadicamente calcari, dolomie e gessi. Il fondovalle e il settore di pianura sono occupati dai sedimenti quaternari del Bacino sinorogenetico del Po occidentale (Piana et al., 2017).

VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ IDROLOGICA

La valutazione della pericolosità idrologica di questa zona ha comportato la verifica idraulica su due sezioni fluviali ritenute critiche: la *sezione 1* è stata individuata immediatamente a monte del ponte di C.so Svizzera, tratto da cui il corso d'acqua può esondare inondando il plesso dell'ospedale Amedeo di Savoia (Fig. 5).

La *sezione 2* è localizzata in corrispondenza del Parco Dora, ex zona industriale riqualificata a partire da circa venti anni fa, mettendo di nuovo a luce la Dora che in quel tratto viaggiava tombinata per centinaia di metri (Fig. 6).

Data la relativa vicinanza delle due sezioni, per i calcoli idraulici si è considerata uguale l'area A del bacino sotteso dalle due sezioni (pari a 1320 km²).



Figura 5. Ubicazione della sezione 1



Figura 6. Ubicazione della sezione 2

ANALISI PLUVIOMETRICA

I dati delle piogge intense riferiti al bacino del F. Dora Riparia sono stati estratti dal “GeoPortale ARPA Piemonte – Atlante piogge intense in Piemonte” (Rif. WEB n. 1).

Su questo sito, è riportato il territorio regionale suddiviso in celle quadrate, di lato pari a 500 metri, per ciascuna delle quali è possibile estrapolare i parametri delle precipitazioni intense con assegnato tempo di ritorno. Mediando i dati relativi a un numero congruo di celle omogeneamente distribuite del bacino del F. Dora Riparia (n. 300), sono state ricavate le curve di probabilità pluviometrica rappresentative del bacino in esame (Fig. 7).

CALCOLO DELLE PORTATE DI MASSIMA PIENA

La portata di massima piena viene calcolata con il Metodo Razionale attraverso la seguente relazione:

$$Q_{max} = k \cdot C \cdot i \cdot A$$

dove:

- Q_{max} è la portata di massima piena del corso d'acqua espressa in m³/s;
- k è un fattore adimensionale che tiene conto della non uniformità delle unità di misura. Se A è espressa in km² ed i in mm/h, per ottenere la portata in m³/s bisogna attribuire a k il valore $1/3,6 = 0,278$;
- C è il coefficiente di deflusso;
- i è l'intensità della precipitazione critica che provoca la piena (mm/ora);
- A è l'area del bacino a monte della sezione presa in esame (km²)

La precipitazione considerate sono quelle descritte dalle curve di probabilità pluviometrica riportate in Fig. 7.

Per determinare l'intensità critica i , è stato valutato il tempo di corrivazione utilizzando la formula di Giandotti, che viene comunemente usata in Italia per bacini con una superficie maggiore di 20 km² e pertanto idonea allo scopo.

dove:

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{h_{mr}}}$$

- t_c è il tempo di corrivazione espresso in ore;
- A è l'area del bacino preso in considerazione in km²;
- L è la lunghezza dell'asta fluviale principale fino al punto di misura;
- h_{mr} è l'altezza media del bacino rispetto alla sezione di chiusura.

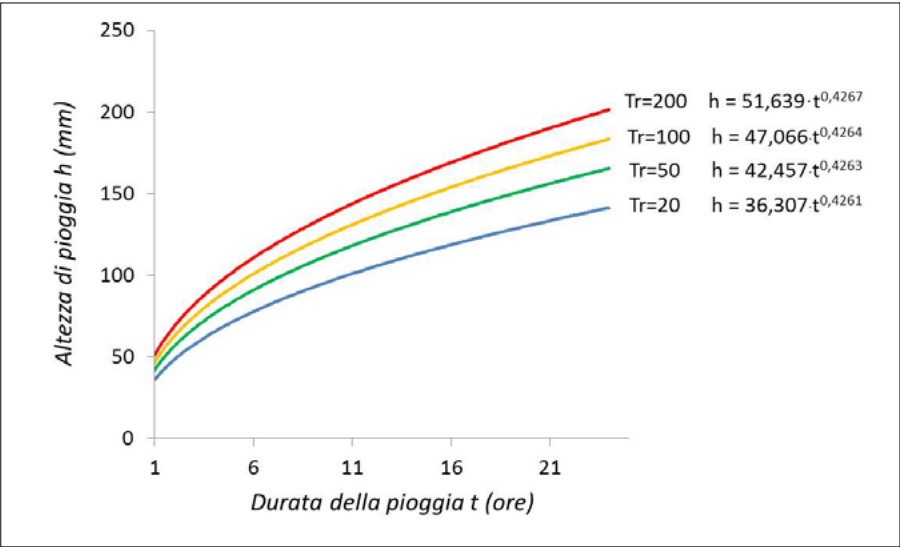


Figura 7. Curve di probabilità pluviometrica rappresentative del bacino

Tabella 1. Parametri fisiografici e tempi di corrivazione del bacino in esame

Area [km ²]	L [km]	h _m [m]	H _{sez} [m]	h _{mr} [m]	t _c [ore]
1320	128,796	1655	230	1425	11,2

Tabella 2. Piogge e intensità critiche ottenute per i diversi tempi di ritorno

Tempo di ritorno [anni]	h _c [mm]	t _c [ore]	i _c [mm/ora]
20	101,676	11,2	9,071
50	118,957	11,2	10,612
100	131,902	11,2	11,767
200	144,823	11,2	12,920

Tabella 3. Uso del suolo nel bacino della Dora Riparia e coefficiente di deflusso medio

Uso del suolo	[km ²]	[%]	C
Zone urbanizzate	50,8	4,3	0,9
Zone industriali, commerciali e reti di comunicazione	7,2	0,6	0,9
Zone estrattive, discariche e cantieri	1,2	0,1	0,9
Zone verdi artificiali non agricole	1,6	0,1	0,6
Seminativi (escluse le risaie)	3,4	0,3	0,7
Prati stabili	24,3	2,0	0,6
Zone agricole eterogenee	137,0	11,5	0,6
Zone boscate	386,9	32,4	0,36
Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	346,3	29,0	0,62
Zone aperte a vegetazione rada o assente	225,9	18,9	0,7
Corsi d'acqua, canali e idrovie, Bacini d'acqua	1,6	0,1	1
Totali e C medio	1186,1	100,0	0,562

Tabella 4. Portate di massima piena attese alle 2 sezioni di misura per i relativi tempi di ritorno

Tempo di ritorno [anni]	k	i _c [mm/ora]	C	A [km ²]	Q _{max} [m ³ /s]
20	0,278	9,071	0,562	1320	1329,9
50	0,278	10,612	0,562	1320	1331,5
100	0,278	11,767	0,562	1320	1332,6
200	0,278	12,920	0,562	1320	1333,8

In Tab. 1 viene riportato il tempo di corrivazione del bacino, insieme ai parametri fisiografici utilizzati per ricavarlo.

A questo punto, l'intensità critica i_c risulterà dal rapporto tra l'altezza della pioggia di durata pari al tempo di corrivazione h_c (per calcolare la quale basta sostituire t_c nella durata t delle equazioni delle curve di probabilità pluviometrica) e il tempo di corrivazione t_c stesso, e sarà riferita quindi a un determinato tempo di ritorno:

$$i_c = \frac{h_c}{t_c}$$

I dati di pioggia e intensità critica ottenuti per entrambi i bacini sono riportati in Tab. 2.

Un altro parametro nel calcolo della portata di massima piena è rappresentato dal coefficiente di deflusso C che tiene conto della natura dei terreni e del tipo di copertura vegetale e, seppure non venga mai preso in considerazione, dal grado di saturazione del terreno al momento dell'infiltrazione. La copertura vegetale influenza notevolmente la capacità di assorbimento. I boschi tendono ad assorbire maggiormente le precipitazioni e pertanto i valori di C sono minori per i boschi rispetto alle aree a pascolo e a colture agrarie.

In Tab. 3, viene riportato l'uso del suolo nel bacino della Dora Riparia (Rif. WEB n. 2) e i dati utilizzati per il calcolo del coefficiente di deflusso C medio.

Come già detto, l'area A del bacino è di circa 1340 km².

Pertanto, utilizzando i dati ricavati, sono state calcolate le portate di massima piena in corrispondenza delle due sezioni (Tab. 4).

VERIFICHE IDRAULICHE

Una volta calcolate le portate di massima piena attese per i quattro tempi di ritorno in corrispondenza delle sezioni prese in esame, si è verificato se tutte queste portate sarebbero defluite normalmente nell'alveo o se in qualche occasione il fiume avrebbe esondato, inondando le zone abitate circostanti. A tal fine, è stato necessario fare un confronto tra le portate di progetto calcolate precedentemente e la portata massima ammissibile in corrispondenza delle due sezioni, pari al prodotto dell'area A della sezione e la velocità del flusso idrico V :

$$Q_{amm} = A \cdot V$$

Per ricavare l'area A sono stati effettuati sopralluoghi sulle sezioni di interes-

Tabella 5. Valori dell'area, del perimetro bagnato e del raggio idraulico delle due sezioni misurate

Sezione	Area sezione [m ²]	p _b [m]	R [m]
1	234	45,6	5,13
2	248	47,0	5,28

se con battute topografiche per ricavare le quote e misure tramite telemetro per ricavare le lunghezze. Come quota massima della sezione è stato preso il livello base delle abitazioni anche laddove fossero presenti opere di contenimento quali muretti o argini. Questa scelta è dovuta al fatto che l'opera di contenimento può cedere o può comunque essere aggirata a monte del tratto considerato e risultare inutile ai fini della sicurezza degli abitanti. Come quota minima è stata invece presa la quota del fondo del corso d'acqua.

Per determinare la velocità del flusso idrico V delle sezioni, si utilizza la formula di Chézy:

$$V = \chi \cdot \sqrt{R \cdot i}$$

dove:

- V è la velocità media in m/s;
- χ è il coefficiente di Chézy che dipende dalla scabrezza dell'alveo e dal raggio idraulico;
- R è il raggio idraulico in m^{1/2}/s;
- i è la pendenza del fondo espressa in %.

Per raggio idraulico si intende il rapporto tra l'area della sezione e il perimetro bagnato. Per perimetro bagnato si intende la somma tra la lunghezza del fondo dell'alveo e delle sponde.

$$R = \frac{A}{p_b}$$

Con i dati ricavati dalle misure effettuate *in situ*, sono stati ottenuti i raggi idraulici delle due sezioni (Tab. 5).

Per il coefficiente di scabrezza, è stata utilizzata l'equazione di Manning:

$$\chi = \frac{1}{n} * R^{\frac{1}{6}}$$

dove:

- n è il coefficiente di Manning
 - R è il raggio idraulico
- per cui la formula di Chézy diventa:

$$V = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * i^{\frac{1}{2}}$$

Il coefficiente n di Manning è stato calcolato dalla seguente formula (Chow, 1959), rifacendosi ai coefficienti parziali della Tab. 6.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

I coefficienti parziali utilizzati e i coefficienti n di Manning ricavati nella formula di Chow (1959) sono riportati in Tab. 7.

La pendenza media i dell'asta principale pari al 3% ($i = 0,03$) è stata ricavata come rapporto tra la differenza tra le quote massime e minime dei pixel del DEM e la LLD, cioè la distanza che intercorre tra la sezione di chiusura e il punto più lontano da essa, posto sul bordo del bacino, misurata seguendo le direzioni di drenaggio (Rif. WEB n. 2).

Coi dati ottenuti, tramite la formula di Chézy sono state calcolate le velocità di deflusso V che, moltiplicate per le aree delle sezioni, forniscono le rispettive portate massime ammissibili per le due sezioni analizzate (Tab. 8).

Tabella 6. Valori da utilizzare per calcolare il coefficiente n di Manning (Chow, 1959)

Condizioni dell'alveo	Valori	
Materiale costituente l'alveo	Terra	0,020
	Roccia	0,025
	Alluvione grossolana	n_0 0,028
	Alluvione fine	0,024
Irregolarità della superficie della sezione	Trascurabile	0,000
	Bassa	0,005
	Moderata	n_1 0,010
	Elevata	0,020
Variazione di forma e dimensione della sezione trasversale	Graduale	0,000
	Occasionale	n_2 0,005
	Frequente	0,010-0,015
Effetto relativo di ostruzioni	Trascurabile	0,000
	Modesto	n_3 0,010-0,015
	Apprezzabile	0,020-0,030
	Elevato	0,040-0,060
Effetto della vegetazione	Basso	0,005-0,010
	Medio	n_4 0,010-0,025
	Alto	0,025-0,050
	Molto alto	0,050-0,100
Grado di sinuosità dell'alveo	Modesto	1,000
	Apprezzabile	m_5 1,150
	Elevato	1,300

Tabella 7 – Valori dei coefficienti parziali utilizzati e relativi coefficienti n di Manning ricavati

	Sezione 1	Sezione 2
n_0	0,024	0,024
n_1	0,01	0,01
n_2	0,01	0,01
n_3	0,06	0,06
n_4	0,05	0,03
m_5	1,2	1,2
n	0,1848	0,1608

Tabella 8. Valori delle velocità di deflusso e portate massime ammissibili nelle due sezioni

Sezione	Area sezione [m ²]	Velocità [m/s]	Q_{amm} [m ³ /s]
1	234	5,20	1216,8
2	248	6,32	1567,36

Tabella 9. Verifica idraulica delle due sezioni prese in esame: in entrambe le sezioni, le portate attese per tempi di ritorno anche solo di 20 anni sono maggiori della portata massima ammissibile con prevedibili allagamenti delle zone edificate circostanti

Tempo di ritorno [anni]	Q_{max} [m ³ /s]	Q_{amm} sezione 1 [m ³ /s]	Q_{amm} sezione 2 [m ³ /s]
20	1329,9	652,5	809,6
50	1331,5	652,5	809,6
100	1332,6	652,5	809,6
200	1333,8	652,5	809,6

CONCLUSIONI

Dal confronto tra le portate massime ammissibili Q_{amm} delle due sezioni e le portate di massima piena (Tab. 9), si rileva che in entrambe le sezioni le portate attese per tempi di ritorno anche solo di 20 anni sono maggiori della portata massima ammissibile, con prevedibili allagamenti delle zone edificate circostanti. Come se non bastasse, bisogna evidenziare che le due sezioni sono state individuate appena a monte di ponti, in corrispondenza dei quali la portata massima ammissibile subisce una ulteriore riduzione.

Al fine di mitigare il rischio geoidrologico della città di Torino, era stato ventilato il progetto di una grandissima cassa di espansione appena a monte di Torino, idea fortemente criticata da alcuni autori del presente lavoro (Bove & Masciocco, 2020) che sconsigliano vivamente le grandi opere a difesa delle città metropolitane, sia per l'impatto sul territorio sia perché lascerebbero comunque indifesi i settori a monte dei rispettivi bacini idrografici; gli interventi (e i conseguenti benefici) dovrebbero infatti essere capillarmente distribuiti sul territorio. Tra l'altro, finanziando i singoli comuni per realizzare piccoli interventi di sistemazione, si favorirebbe la ripresa del lavoro su tutto il territorio nazionale.

BIBLIOGRAFIA

A. BOVE, L. MASCIOCOCCO (2020), *Proposte per la mitigazione del rischio di alluvione in Italia*. Geologia dell'Ambiente, Periodico trimestrale della SIGEA - Società Italiana di Geologia Ambientale, N. 4/2020, Anno XXVIII - ottobre-dicembre 2020, 21-25, ISSN 1591-5352.

V.T. CHOW (1959), *Open Channel Hydraulics*. Mc Graw Hill Company, 680 pp.

F. PIANA, G. FIORASO, A. IRACE, P. MOSCA, A. D'ATRI, L. BARALE, P. FALLETTI, G. MONEGATO, M. MORELLI, S. TALLONE, G.B. VIGNA (2017), *Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps-Apennines interference zone)*, Journal of Maps, 13:2, 395-405, DOI:10.1080/17445647.2017.1316218.

RIFERIMENTI WEB

http://webgis.arpa.piemonte.it/atlante_pioggia_webapp/

www.idrologia.polito.it/didattica/PIT/2013/2_AnalisiRegionale/Altro-Materiale/DATI_AtlanteBaciniImbriferi.pdf

Proposte per rappresentare la suscettibilità del territorio al dissesto geo-idrologico

Proposals to represent the susceptibility of the territory to geo-hydrological instability

Parole chiave: cartografia, pericolosità geo-idrologica, frane, alluvioni
Key words: mapping, geo-hydrologic hazard, landslides, floods

Battista Taboni

Università degli Studi di Torino,
Vicepresidente SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: battista.taboni@unito.it

Mauro Bonasera

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale ISPRA
E-mail: mauro.bonasera@isprambiente.it

Annalisa Bove

Geologo, Libero Professionista,
Presidente SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: annalisa.bove@geologiapiemonte.it

Gessica Umili

Università degli Studi di Torino,
Segretario SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: gessica.umili@unito.it

Luciano Masciocco

Università degli Studi di Torino,
Consigliere nazionale SIGEA-APS
E-mail: luciano.masciocco@unito.it

1. PREMESSA

Nel presente lavoro vengono fornite alcune indicazioni generali per rappresentare la suscettibilità del territorio al dissesto idrogeologico con la speranza che le direttive che regolano questa materia di stringente attualità diventino chiare, di semplice attuabilità e omogenee su tutto il territorio nazionale o addirittura comunitario, come già auspicato in altri contesti da alcuni degli Autori (Gisotti *et al.*, 2107; Bove & Masciocco, 2020a; Bove & Masciocco, 2020b).

2. LA SUSCETTIBILITÀ DEL TERRITORIO ALLE FRANE

Da almeno mezzo secolo, sono stati proposti numerosi metodi per la valutazione della suscettibilità del territorio alle frane, anzi, alle diverse tipologie di frana: frane superficiali, frane profonde e, tra queste, crolli, ribaltamenti, scivolamenti, flussi, etc. (per una rassegna esaustiva cfr. Guzzetti *et al.*, 1999; Guzzetti *et al.*, 2005; Rossi *et al.*, 2010).

Al fine di applicare tali metodi si dovrebbero prendere in considerazione i parametri dai quali essenzialmente dipende l'attitudine di una massa di terreno a franare (Benini, 1970):

- costituzione geologica (composizione litologica, struttura, giacitura degli strati);
- configurazione topografica (essenzialmente la pendenza);
- condizioni climatiche (principalmente le piogge; si è visto infatti come l'acqua influisca sui valori della coesione e del coefficiente d'attrito);
- copertura vegetale (per gli effetti di rinsaldamento, protezione, assorbimento di acqua dal terreno delle formazioni vegetali).

Inoltre bisogna considerare le circostanze che modificano l'equilibrio della massa di terreno:

a) *aumento del peso*, che può essere provocato in vario modo:

- aumento del peso specifico di uno strato di terreno per effetto della sua imbibizione. Infatti un terreno asciutto può avere un peso specifico di 1300 - 1500 kg/m³, un terreno bagnato 1700 - 1800 kg/m³;
- aumento di peso dovuto ad un sovraccarico naturale per effetto di materiale detritico (alluvionale, di frana superiore, ecc.) o di neve di valanga (o di nevicata eccezionale), che si è accumulato sopra lo strato di terreno in esame;
- aumento di peso causato dalla costruzione di fabbricati, manufatti, discariche artificiali, ecc.;

b) *aumento dell'inclinazione dello strato di terreno*, che può essere dovuto a varie cause, tra cui:

- erosione del piede di un pendio provocato da un torrente;
- scavi o rilevati per la realizzazione di una strada (o un canale) a mezza costa;

c) *variazioni delle caratteristiche geotecniche del terreno, e in particolare della coesione e dell'angolo di attrito*:

- come è già stato detto precedentemente è l'acqua la causa principale che riduce i valori di queste caratteristiche meccaniche del terreno.

Le cause che provocano queste variazioni sono numerose, alcune naturali, altre indotte dall'uomo. Inoltre alcune cause sono preparatorie (ad esempio il

disboscamento), cioè predispongono le condizioni favorevoli al verificarsi delle frane, che però si verificano quando altre cause (determinanti) rompono l'equilibrio. Spesso non è una sola causa a provocare il franamento, ma vi è il concorso di più d'una.

Si riporta di seguito un elenco, predisposto dal Desio (1973), che si ritiene abbastanza completo:

Cause preparatorie: fattori naturali

- a) condizioni climatiche: piovosità, insolazione, escursioni termiche;
- b) configurazione morfologica e, soprattutto, inclinazione del pendio e sue variazioni;
- c) composizione geolitologica;
- d) struttura tettonica e in particolare disposizione degli strati rispetto al pendio (franapoggio, reggipoggio ecc.);
- e) microsismi e terremoti dei gradi più bassi;
- f) movimenti orogenici;
- g) rilassamento delle tensioni interne delle rocce;
- h) alterazione meteorica delle rocce;
- i) circolazione delle acque superficiali e sotterranee;
- l) azione erosiva dei corsi d'acqua e del moto ondoso al piede dei pendii;
- m) variazioni di livello dei laghi;
- n) ritiro di ghiacciai;

Cause preparatorie: fattori antropici

- a) disboscamento;
- b) scavi di ogni genere, come trincee, canali, strade a mezza costa, gallerie ecc.;
- c) costruzione di edifici sui pendii;
- d) vibrazioni prodotte dal passaggio di veicoli pesanti (treni, autocarri, ecc.);
- e) irrigazioni;
- f) abbandono della manutenzione dei campi in aree montane e collinari.

Cause determinanti: fattori naturali

- a) particolari eventi meteorologici come precipitazioni eccezionali, sgelo improvviso;
- b) rapido scalzamento di ripe fluviali e marine per piene straordinarie dei corsi d'acqua e per mareggiate;
- c) terremoti;
- d) sovraccarichi improvvisi per caduta di massi, di valanghe o di materiali alluvionali ad opera di una alluvione localizzata.

Cause determinanti: fattori antropici

- a) variazioni artificiali del livello di laghi e dei serbatoi;
- b) perdite d'acqua dall'alveo di canali, acquedotti ecc.;
- c) apertura di cave, di trincee e di gallerie;
- d) esplosione di mine;
- e) costruzioni sul ciglio delle scarpate.

Pragmaticamente, Desio conclude che non si può distinguere rigidamente tra cause preparatorie e cause determinanti, perché uno stesso fattore può agire con un'azione preparatoria alla

frana quando i coefficienti di sicurezza sono sufficientemente elevati, ed agire invece in modo determinante quando stanno per essere superate le condizioni di equilibrio, e che quindi sono cause determinanti anche le cause preparatorie quando agiscono in condizioni di equilibrio critico.

3 - PROPOSTE PER RAPPRESENTARE LA SUSCETTIBILITÀ AI FENOMENI FRANOSI

A più di 30 anni dall'entrata in vigore della normativa sulla difesa del suolo (Legge 183/1989), per avere un'idea della suscettibilità del nostro territorio ai fenomeni franosi è attualmente a disposizione la carta della Pericolosità da frana PAI (Fig. 1) realizzata dall'ISPRA nell'ambito del Rapporto 2021 sul dissesto idrogeologico in Italia (Trigila et al., 2021).

Dall'osservazione di tale cartografia emergono le seguenti osservazioni:

- tale cartografia dovrebbe essere chiamata: *collage* delle carte di pericolosità realizzate in Italia;
- anche in questo caso ci sarebbe da obiettare che il lavoro è incompleto o, come minimo, costruito con criteri di classificazione non omogenei (la Val d'Aosta frana, il Piemonte molto meno; il Trentino frana, l'Alto Adige no; la Calabria frana come la Puglia...);
- è difficilissimo, se non impossibile, valutare la pericolosità da frana in quanto il termine pericolosità, oltre al concetto di magnitudo, contiene in sé anche quello di frequenza.

Molto probabilmente, il termine carta di Pericolosità deriva da obblighi imposti dalla normativa di settore europea e dai suoi recepimenti nazionali, ma il consiglio è quello di sostituire il (o almeno di affiancare al) termine pericolosità da frana quello di suscettibilità alle frane.

A questo punto ci sentiamo di proporre dei suggerimenti per realizzare cartografie di suscettibilità ai fenomeni franosi sia a livello nazionale sia a livello locale.

3.1. CARTOGRAFIA A LIVELLO NAZIONALE

Si parte dalla constatazione oggettiva che attualmente non esistono dati relativi ai parametri della suscettibilità su tutto il territorio nazionale. Per cui, anche se alcuni autori hanno proposto recentemente algoritmi e metodi statistici per estendere dati ricavati in aree campione sull'intero Paese, realizzando così cartografie nazionali per ogni tipologia di frana (Loche et al., 2022), ci sentiamo di dire quanto segue:

- la scala di rappresentazione cartografica dell'intero paese renderebbe inutili molti sforzi sui dettagli che invece risultano necessari nelle cartografie a scala di pianificazione territoriale;
- per dare un'idea della suscettibilità alle frane del territorio nazionale è invece molto adeguato l'utilizzo di un parametro attendibile e disponibile per tutto il territorio nazionale in forma digitale, ad esempio l'acclività (Fig. 2) o l'energia del rilievo (Fig. 3).

L'analisi di acclività ed energia del rilievo rientrano nelle tecniche utili a descrivere quantitativamente la morfologia del terreno e parametrizzare i processi naturali (es., velocità del flusso d'acqua, intensità dell'erosione del suolo). Entrambi sono considerati fattori predisponenti i fenomeni franosi.

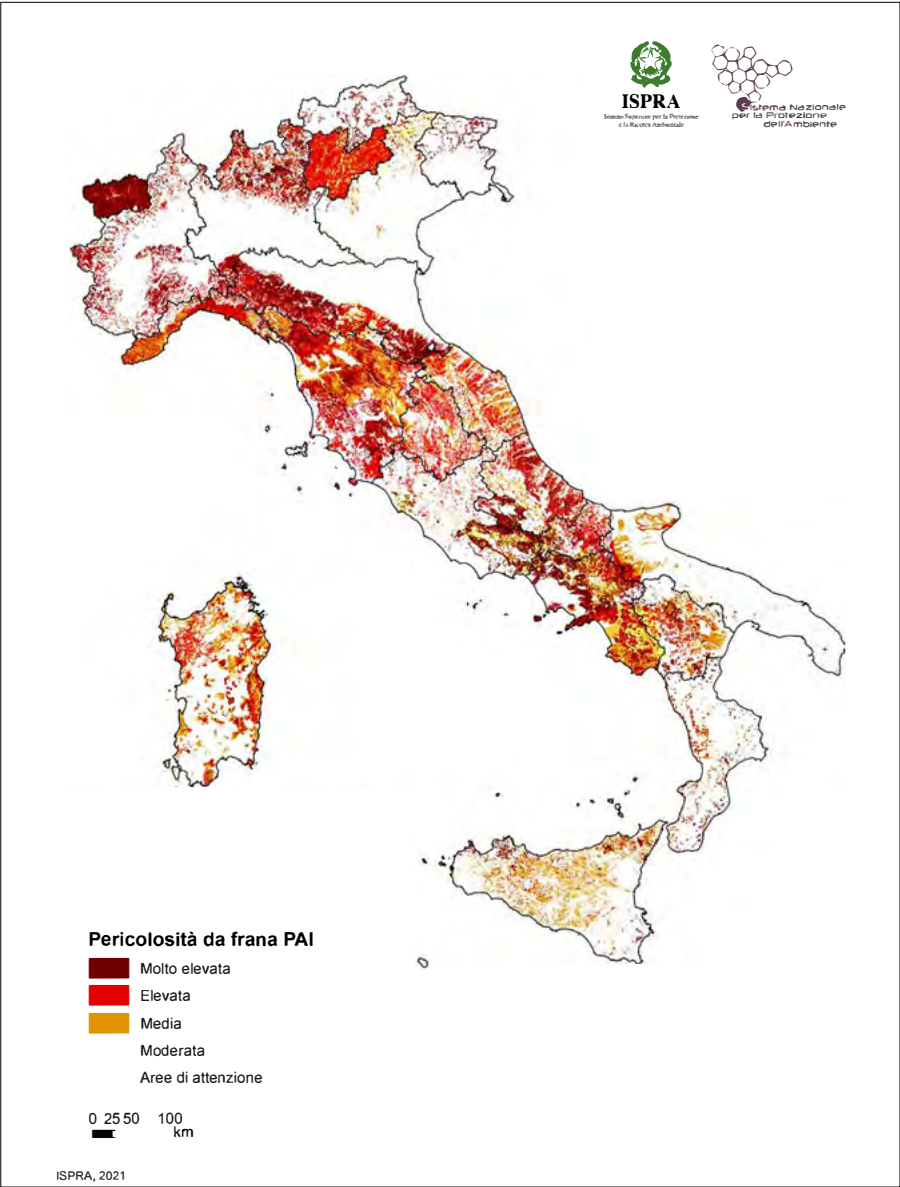


Figura 1. Carta della "Pericolosità da frana PAI" realizzata dall'ISPRA (Trigila et al., 2021)

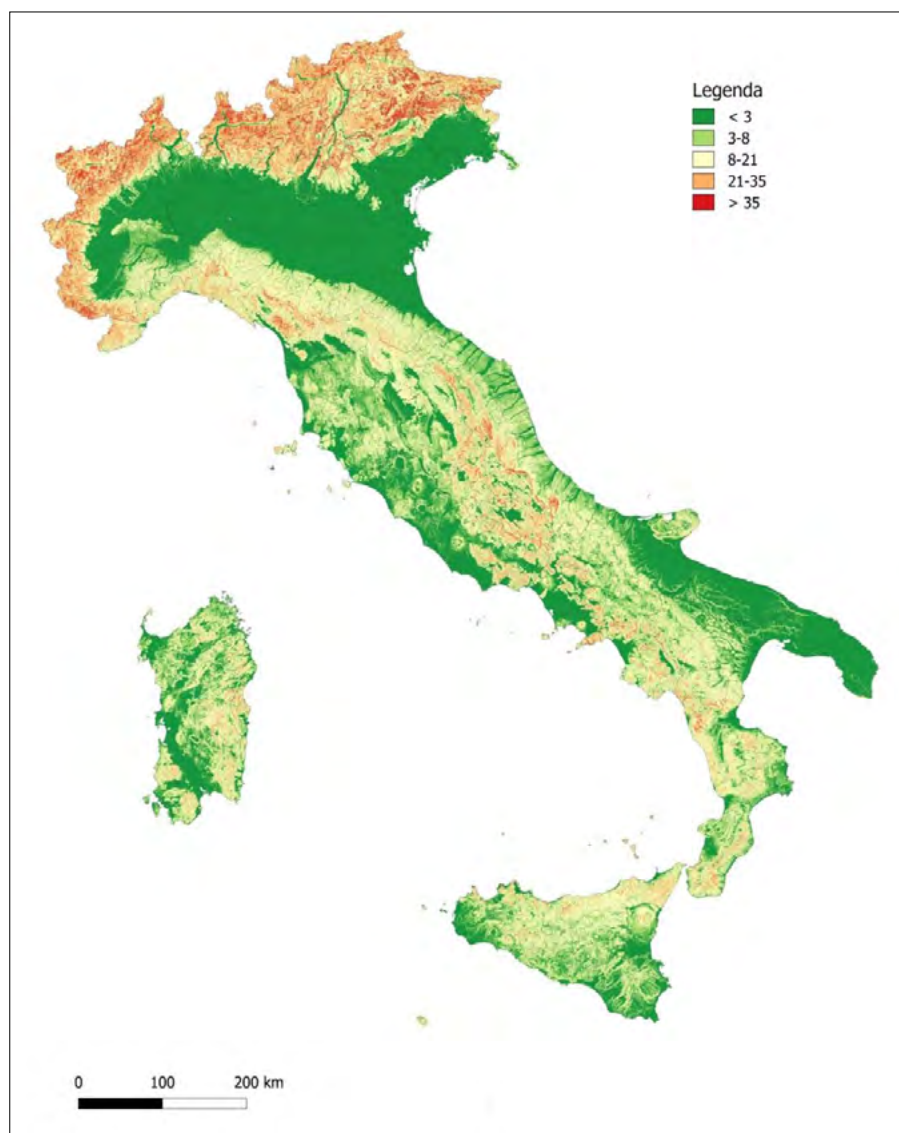


Figura 2. Carta della "Acclività del territorio nazionale" realizzata utilizzando un modello digitale del terreno con passo 20 m. Unità di misura in legenda (%)

L'**acclività** è il rapporto tra la differenza di quota (h) e la distanza planimetrica (d) tra due punti vicini. Si esprime in percentuale (h/d %) o in gradi ($\arctg h/d$). In un software GIS questa relazione viene quantificata tramite la derivata prima della superficie $z = f(x, y)$, calcolandola sull'elevazione di ogni cella del modello digitale del terreno (DTM) sottoposto al calcolo. Questo implica, per ogni cella, una derivazione in ciascuna delle direzioni verso le 8 celle limitrofe. Il software calcola il tasso massimo di variazione tra ogni cella e i suoi vicini (la variazione massima di quota in base alla distanza tra la cella e le otto vicine). La pendenza, quindi, è data dal rapporto tra massima differenza di quota e distanza tra i centri delle celle. Ogni cella ottenuta nel *raster* generato ha un proprio valore di pendenza (Moore *et al.*, 1991; Tarboton, 1997).

L'**energia del rilievo** è la differenza tra la quota massima e la quota minima, parametro indicativo dell'energia potenziale in un'area specifica. Può quindi

essere espressa utilizzando l'unità di misura dell'elevazione locale. In un software GIS, questo implica la creazione di un reticolo che viene sovrapposto al DTM.

Gli strumenti di statistica sui *raster* calcolano la differenza di elevazione tra le celle all'interno di ogni quadrato della maglia impostata. Il calcolo restituisce uno *shapefile* con il valore dell'energia del rilievo per ogni poligono coincidente con le celle del reticolo. Data la variabilità del parametro, in fase di categorizzazione del *layer* generato, è solitamente opportuno suddividere i valori in classi. L'energia di rilievo calcolata su aree di piccole dimensioni può consentire l'individuazione di zone caratterizzate da differente azione erosiva e approfondimento fluviale più o meno marcato. Questa diversa intensità di erosione può essere indicativa di sollevamenti o abbassamenti differenziali recenti o ancora in atto (O'Callaghan, 1984; Willgoose & Hancock, 1998; Simu, 2017).

In sintesi, la pendenza si riferisce alla ripidità o inclinazione in un punto o

tratto specifico che influisce sulle forze gravitazionali agenti sul terreno, l'energia del rilievo rappresenta l'ampiezza della variazione altimetrica, indicazione dell'energia potenziale accumulata in un'area geografica più estesa. In un'area la pendenza può variare notevolmente anche in presenza di un'energia del rilievo costante.

Per ottenere la carta dell'energia del rilievo di Fig. 3, è stato necessario suddividere tutta l'area del territorio nazionale in una griglia con maglie da 1 km^2 (corrispondenti alle maglie del reticolato chilometrico IGM) per ciascuna delle quali è stato determinato il dislivello massimo, espresso in metri. Data la variabilità del paramento è stato ritenuto opportuno suddividere i valori di energia del rilievo in 10 classi. I valori dell'energia del rilievo sono stati calcolati utilizzando il comando *Zonal Statistic* in *Spatial Analyst*.

3.2. CARTOGRAFIA A LIVELLO

LOCALE

Aumentando la scala a livello comunale, è chiaro che si potranno e dovranno prendere in considerazione i parametri citati nel paragrafo 2. Ma anche in questo caso, si consiglia di applicare metodi omogenei su tutto il territorio nazionale e facilmente applicabili:

- suddividere la suscettibilità alle frane in base all'acclività e all'energia del rilievo;
- mettere in evidenza le diverse tipologie di frana che si possono verificare nelle zone segnalate come suscettibili;
- indicare come zone suscettibili di dissesto, oltre alle zone di innesco dei movimenti franosi, anche le vie di deflusso del materiale destabilizzato, cioè gli impluvi (questo discorso verrà ripreso nel paragrafo 6).

4. LA PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE

Secondo l'Istituto Istituito Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), un'alluvione è l'allagamento temporaneo di aree che abitualmente non sono coperte d'acqua. L'inondazione di tali aree può essere provocata da fiumi, torrenti, canali, laghi e, per le zone costiere, dal mare (Rif. WEB n. 1).

Una corretta valutazione della pericolosità da alluvione va condotta in ogni sezione dei corsi d'acqua valutando l'estensione laterale della portata di progetto (solitamente con tempo di ritorno di 200 o 500 anni). Questa valutazione deve essere effettuata senza considerare la presenza di argini o di altri tipi di difesa che va a mitigare il rischio delle abi-

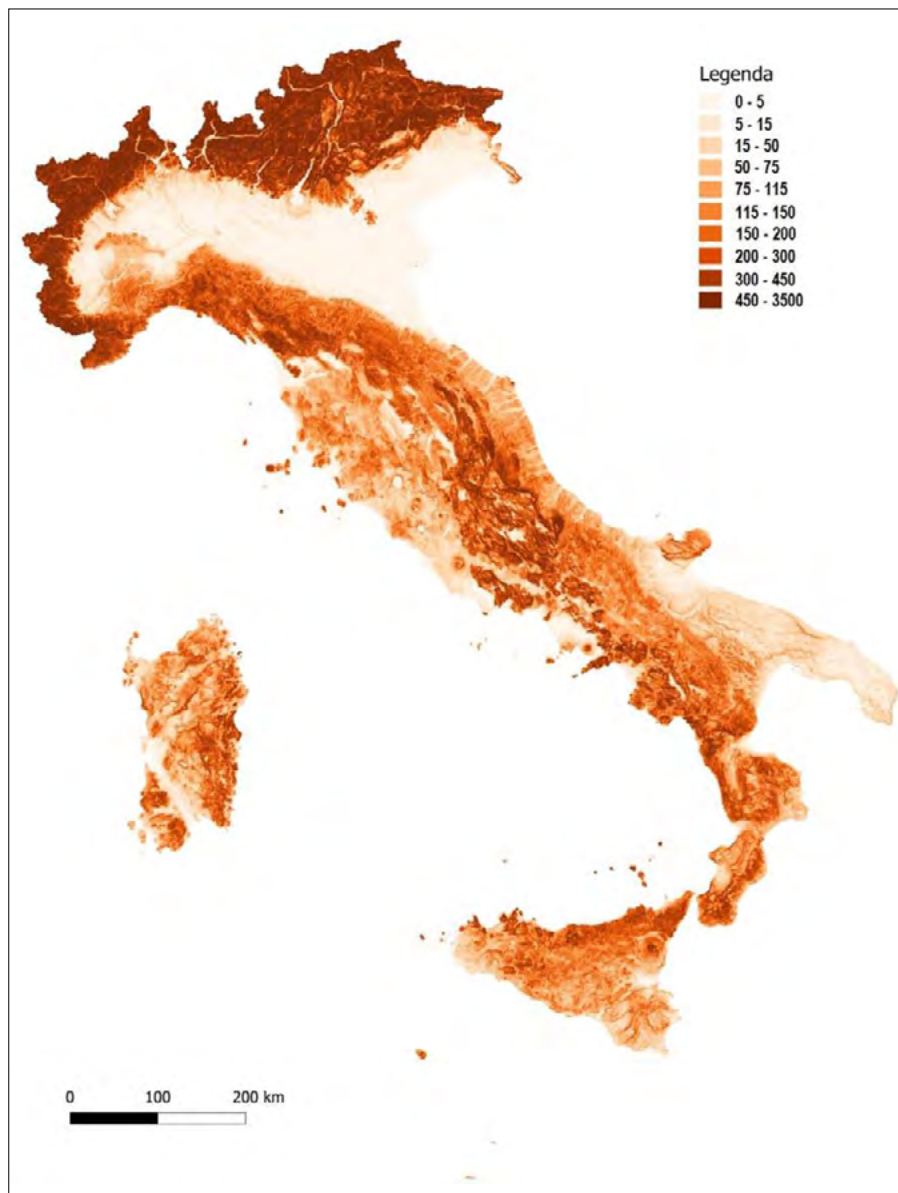


Figura 3. Carta della "Energia del rilievo del territorio nazionale" realizzata utilizzando un modello digitale del terreno con passo 20 m. Unità di misura in legenda (m)

tazioni esposte nella zona pericolosa abbassando la loro vulnerabilità, ma senza incidere minimamente sulla pericolosità.

5. PROPOSTE PER RAPPRESENTARE LA PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE

Anche per quanto riguarda la pericolosità da alluvione, l'ISPRA realizza la mosaicatura delle aree a pericolosità idraulica perimetrate dalle Autorità di Bacino Distrettuali (Trigila *et al.*, 2021). La mosaicatura viene effettuata secondo i tre scenari del D. Lgs. 49/2010 (Repubblica Italiana, 2010): pericolosità elevata con tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (alluvioni frequenti), pericolosità media con tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (alluvioni poco frequenti) e pericolosità bassa (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi).

Così come per le frane, anche nel caso delle alluvioni sembra che l'inten-

to sia quello di rispondere comunque al recepimento della direttiva europea, senza curarsi dell'omogeneità dei dati a disposizione. Il risultato è ben visibile, ad esempio nella cartografia delle aree allagabili per scenario di pericolosità da alluvione media (Fig. 4):

- la Valle d'Aosta si allaga più del Piemonte;
- l'Alto Adige non si allaga rispetto alle aree limitrofe;
- il Molise si allaga rispetto alle regioni confinanti;
- la Calabria sembra destinata ad essere interamente sommersa;
- la pianura emiliano romagnola è giustamente indicata come pericolosa (a causa della sua generale soggiacenza ai corsi d'acqua che sostenuti a stento dagli argini la attraversano a quote più alte), ma appena oltre il confine, il Polesine, nelle stesse condizioni di pericolosità, non sembra aver problemi.

Anche per la pericolosità da alluvioni quindi vengono di seguito proposte alcune idee per la cartografia della pericolosità da alluvione sia a livello nazionale sia a livello locale.

5.1. CARTOGRAFIA A LIVELLO NAZIONALE

Poiché la scala molto piccola non permette la visione di dettagli, si consiglia di:

- indicare gli impluvi principali e secondari utilizzando le tecniche suggerite nel par 6 e spiegando nelle note illustrative della carta i criteri di valutazione di pericolosità idrologica da applicare a livello locale;
- indicare le coste basse, pericolose perché suscettibili di allagamenti per cause di diversa origine;
- indicare le aree caratterizzate da terre basse (*neder lands*), in cui la pianura si trova ormai a una quota inferiore al letto dei corsi d'acqua.

5.2. CARTOGRAFIA A LIVELLO LOCALE

A livello comunale, bisogna dare dei metodi semplici e omogenei da utilizzare su tutto il territorio nazionale o addirittura comunitario (a questo dovrebbe servire l'Unione Europea):

- utilizzare pioggia di progetto di 500 mm giorno (molti territori sono sprovvisti di serie storiche di piogge intense per poter calcolare le curve di probabilità pluviometrica con diversi tempi di ritorno);
- valutare le portate di massima piena nelle sezioni non solo dei corsi d'acqua, ma di tutti gli impluvi in cui convergono le linee di flusso, perpendicolari alle linee ad egual potenziale di quota (isopse). Qui si incanalano naturalmente flussi che per l'elevata energia cinetica possono essere devastanti per l'uomo e i suoi beni esposti imprudentemente su queste traiettorie. Il materiale che transita può essere tanto l'acqua di ruscellamento (alluvioni), quanto la neve (valanghe), quanto il terreno (colate di terra) o i detriti (colate di detrito) e, in altri contesti, i flussi di lava, i lahar, le nubi ardenti;
- valutare lateralmente fin dove si estende la portata di progetto (utilizzando l'intensità di 500 mm/giorno e un coefficiente di deflusso = 1);
- mappare le terre basse sopra descritte e, grazie alla scala maggiore, mettere in risalto le differenze di quota tra il piano campagna e la quota dei letti fluviali pensili.

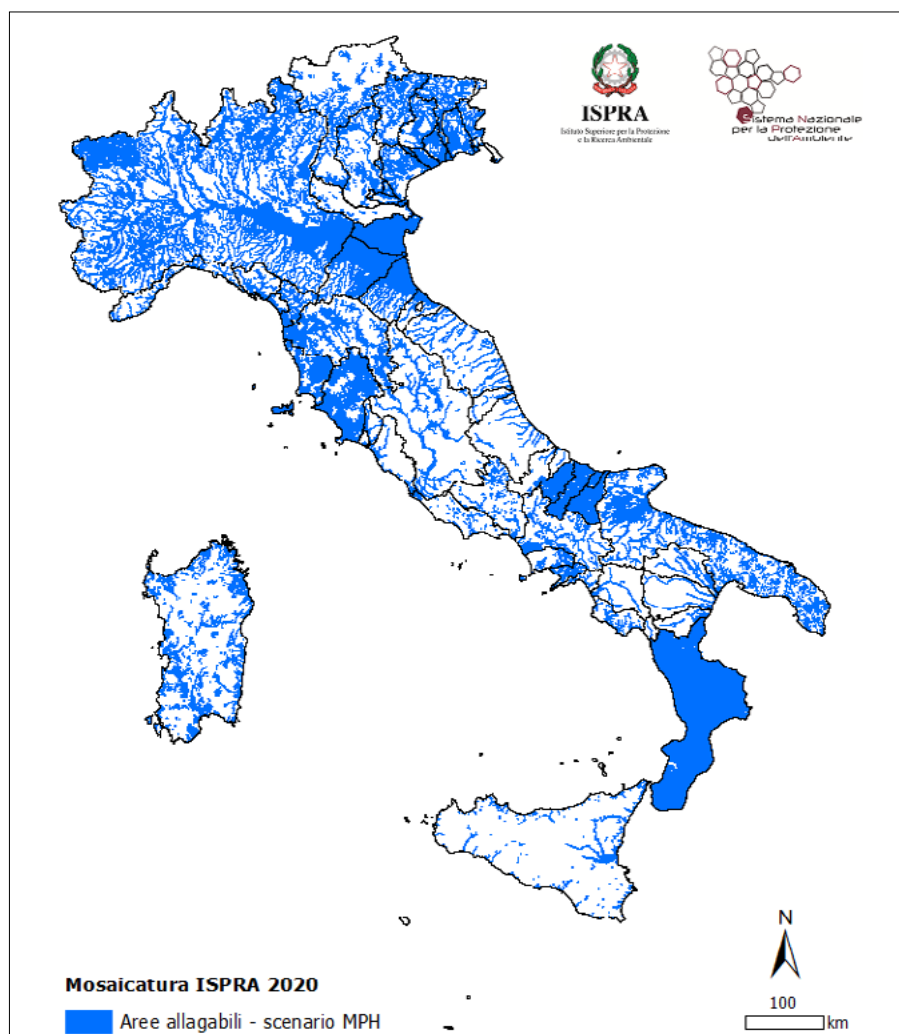


Figura 4. Aree allagabili per scenario di pericolosità da alluvione media (Medium Probability Hazard – MPH) – Mosaicultura ISPRA, 2020 (Trigila et al., 2021)

6. RAPPRESENTAZIONE DEGLI IMPLUVI

Per concludere, si danno alcuni suggerimenti per rappresentare gli impluvi quali zone tra le più suscettibili al dissesto geo-idrologico.

Per visualizzare, mappare e quantificare gli effetti puramente morfologici legati a processi di deflusso, esistono numerosi strumenti, disponibili direttamente tramite piattaforme come GRASS GIS (Rif. WEB n. 2) e per estensione disponibili all'uso nel software Quantum Gis. Tutti questi strumenti hanno in comune la pura e semplice dipendenza da un modello digitale del terreno (DTM), da un modello di elevazione (DEM) o di una superficie (DSM). In generale, si tratta di algoritmi che, sfruttando relazioni geometriche e trigonometriche, permettono una valutazione semplice e rapida, ma pur sempre quantitativa, della tendenza di una data morfologia a concentrare il deflusso liquido e a esprimerne l'ordine di grandezza o la quantità. Benché i modelli teorici da cui derivano questi strumenti facciano riferimento al deflusso idrico superficiale, nulla vieta che

questo dato possa esser valido anche per altri fluidi, quali, ad esempio, miscele di acqua e sedimenti.

Di seguito si presentano tre di questi indici: *Stream Power Index*, *Flow accumulation*, *Topographic Wetness Index*, utilizzati rispettivamente nelle Figure 5, 6 e 7 nel territorio comunale di Montebello, interessato dall'evento alluvionale del 25 ottobre 2011.

6.1 STREAM POWER INDEX

Lo *Stream Power Index* (o SPI) descrive l'entità del deflusso liquido per ogni punto del modello considerato. Questo indice di fatto esprime la tendenza delle forze esercitate dalla gravità a muovere acqua, o anche altri fluidi, verso valle. L'indice è calcolato come segue:

$$SPI = \alpha \cdot \tan(\beta)$$

dove α corrisponde all'area cumulata a monte del punto considerato per unità lineare di curva di livello, mentre β è l'angolo della pendenza locale. Per valori di $\alpha < 0$, l'indice stesso avrà valori negativi: questa condizione esprime il

caso in cui il deflusso verso un punto sia alimentato da territorio al di fuori dell'area in studio (Moore et al., 1991).

L'indice SPI è disponibile tra i risultati prodotti dall'algoritmo *r.watershed*.

6.2 FLOW ACCUMULATION

L'indice *Flow Accumulation* (o F) quantifica per ciascun punto del modello dell'area in studio il numero di linee di deflusso che lo attraversano: ciò corrisponde al numero di linee di flusso dell'intera area che abbiano almeno un vertice in corrispondenza della cella considerata. Le linee di deflusso sono simulate secondo il *raindrop method*, che replica appunto il movimento verso valle di una goccia di pioggia secondo quanto imposto dalla morfologia locale. Le linee di deflusso tenderanno pertanto a concentrarsi in impluvi e valli.

L'indice F descrive, dunque, aree di accumulo. Poiché per quantificare F, anche le linee di deflusso devono esser quantificate (in termini di lunghezza e posizione), con un rapido in studio: infatti, per come è definito l'indice F, moltiplicandolo per la risoluzione calcolo è possibile determinare l'area del bacino idrografico sotteso a ciascuna cella del modello digitale dell'area del modello (cioè, l'area coperta da una singola cella) si ricava l'area a monte che contribuisce al deflusso in un dato punto (Mitasova et al., 1995).

Questo indice è calcolato utilizzando l'algoritmo *r.flow*.

6.3 TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX

Il *Topographic Wetness Index* (o TWI), anche denominato *Topographic Concentration Index* (o TCI), appare molto simile all'indice SPI. Concettualmente, infatti, esprime sempre la tendenza dell'acqua a concentrarsi in un dato punto, oltre alla propensione dell'attrazione gravitazionale a muovere fluidi verso valle. La definizione dell'indice è la seguente:

$$TWI = \ln(\alpha / \tan(\beta))$$

dove, di nuovo, α rappresenta l'area cumulata a monte del punto considerato per unità lineare di curva di livello, mentre β è l'angolo della pendenza locale. In questo caso, l'indice ha valore negativo se $\alpha / \tan(\beta) < 1$. (Quinn et al., 1991)

Questo indice è disponibile come TCI tra i risultati prodotti degli algoritmi *r.terraflow* e *r.watershed*, oppure, come TWI, come risultato degli appositi algoritmi *r.topidx*.

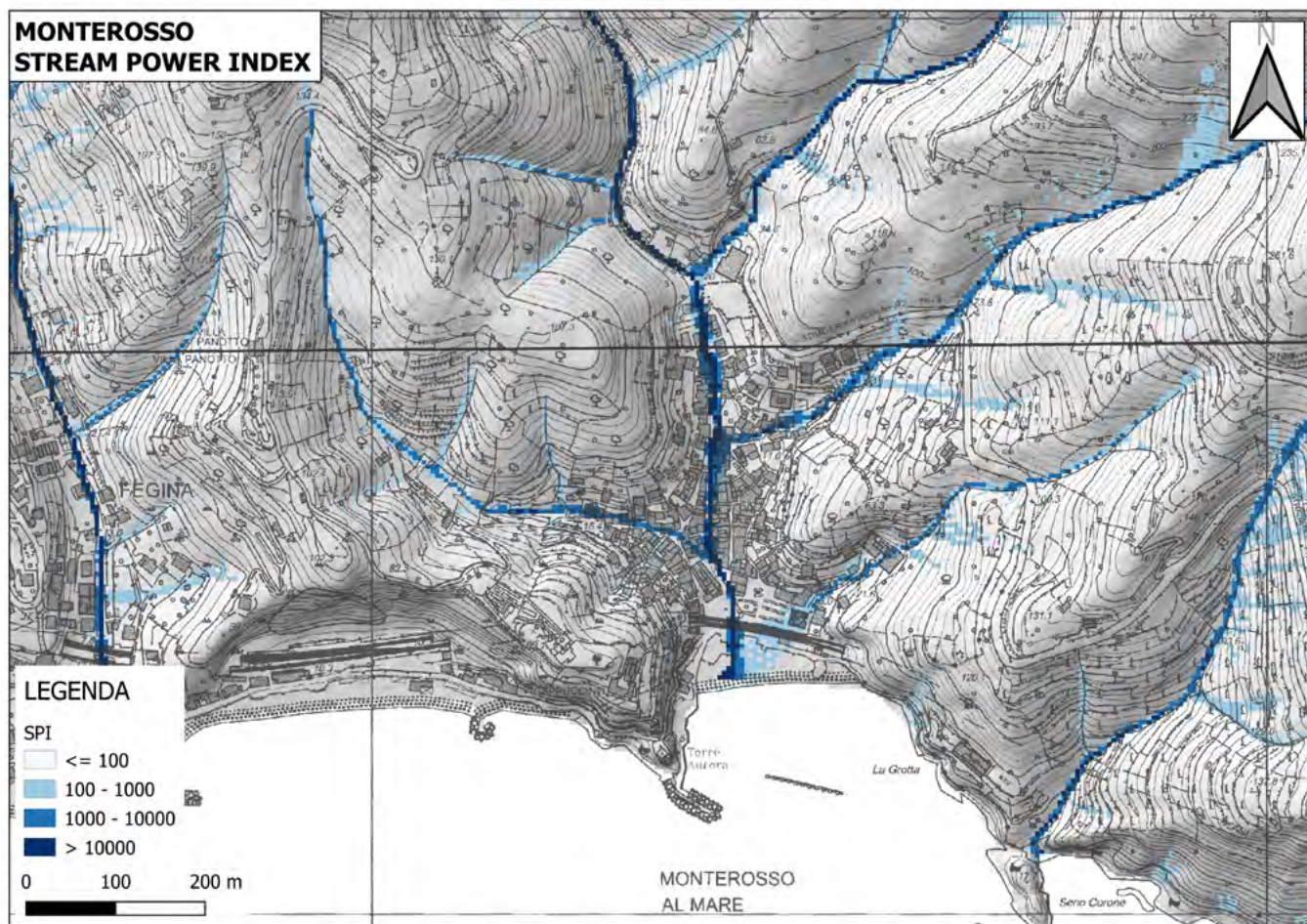


Figura 5. Rappresentazione degli impluvi nel territorio comunale di Monterosso utilizzando lo Stream Power Index

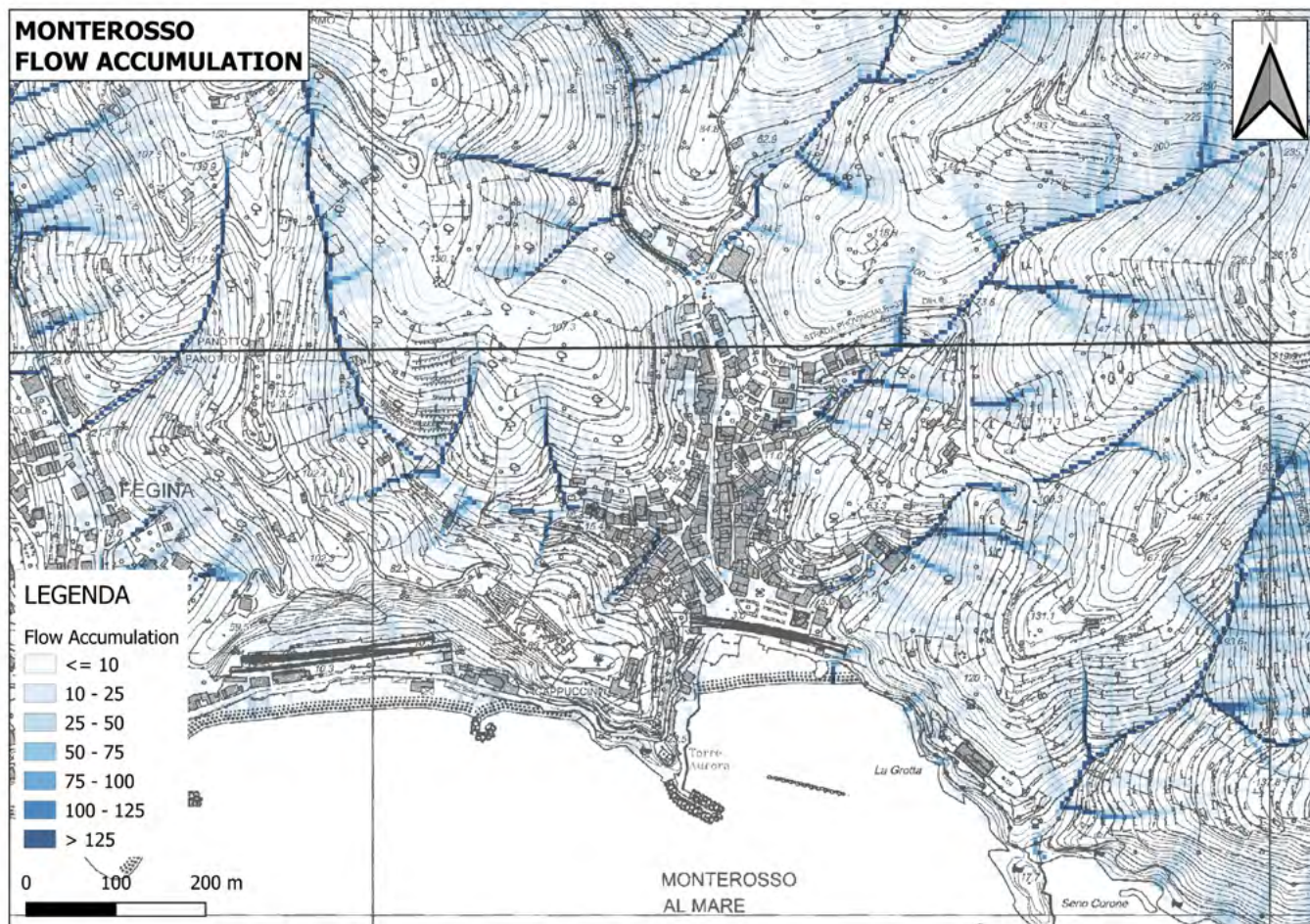


Figura 6. Rappresentazione degli impluvi nel territorio comunale di Monterosso utilizzando il Flow accumulation

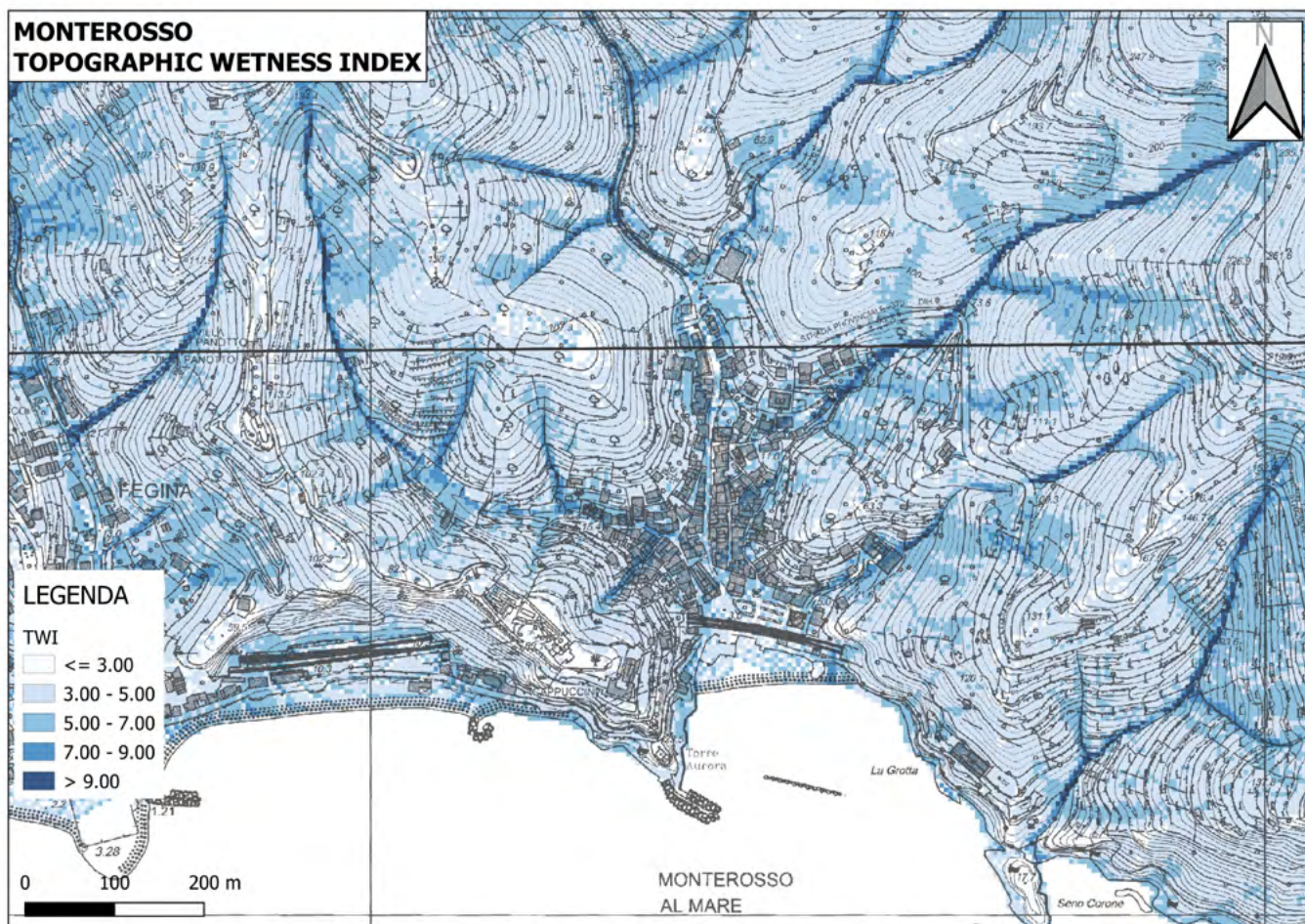


Figura 7. Rappresentazione degli impluvi nel territorio comunale di Monterosso utilizzando il Topographic Wetness Index

BIBLIOGRAFIA

- BENINI G. (1990), *Sistemazioni idraulico forestali*. Collana Scienze forestali e ambientali. UTET, Torino, 308 pp., ISBN-13: 978-8802043401.
- BOVE A., MASCIOTTO L. (2020 a), *Pericolosità e rischio geomorfologico in Italia: concetti e criticità*. Periodico dell'Associazione Georisorse Ambiente - GEAM PANGEA - Quadrimestrale, N.3, marzo-giugno 2020, 27-37, ISSN 2704-7458.
- BOVE A., MASCIOTTO L. (2020 b), *Proposte per la mitigazione del rischio di alluvione in Italia*. Geologia dell'Ambiente, Periodico trimestrale della SIGEA - Società Italiana di Geologia Ambientale, N. 4/2020, Anno XXVIII - ottobre-dicembre 2020, 21-25, ISSN 1591-5352
- DESIO A. (1985), *Geologia applicata all'ingegneria*. Hoepli editore, ristampa anastatica della terza edizione riveduta e aggiornata, 1232 pp.
- GISOTTI G., MASCIOTTO L., VANNUCCI G. (2016), *Proposte per la revisione e il riordino della normativa in materia di difesa del suolo e di contrasto al dissesto idrogeologico*. Geologia dell'Ambiente. Periodico della SIGEA, Società Italiana di Geologia Ambientale, n. 1/2016, ISSN 1591-5352, 26-29.
- GUZZETTI F, CARRARA A, CARDINALI M, REICHENBACH P. (1999), *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. Geomorphology, 31, 181-216. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
- GUZZETTI F, REICHENBACH P, CARDINALI M, GALLI M. AND ARDIZZONE F. (2005), *Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale*. Geomorphology, 72, 272- 299. DOI:10.1016/j.geomorph.2005.06.002.
- LOCHE M., ALVIOLI M., MARCHESINI I., BAKKA H., LOMBARDO L. (2022), *Landslide susceptibility maps of Italy: Lesson learnt from dealing with multiple landslide types and the uneven spatial distribution of the national inventory*. Earth-Science Reviews 232 (2022) 104125.
- MITASOVA H., MITAS L., BROWN W.M., GERDES D.P., KOSINOVSKY I., BAKER, T. (1995), *Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS*. International Journal of Geographical Information Systems, Vol. 9(4), pp.: 433-446.
- MOORE I.D., GRAYSON R.B., LADSON A.R. (1991), *Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications*, Hydrological Processes, Vol 5(1), pp.: 3-30. DOI: 10.1002/hyp.3360050103
- O'CALLAGHAN, J.F., & MARK, D.M. (1984), *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. Computer vision, graphics, and image processing, 28(3), 323-344.
- QUINN P., K. BEVEN K., CHEVALLI R P., PLANCHON O. (1991), *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using Digital Elevation Models*, Hydrological Processes, Vol 5(1), pp.: 59-79. DOI: 10.1002/hyp.3360050106
- REPUBBLICA ITALIANA (2010), *Decreto legislativo 23/02/2010, n. 49: "Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni"*. Pubblicato nella Gazzetta Ufficiale 2 aprile 2010, n. 77.
- ROSSI M, GUZZETTI F, REICHENBACH P, MONDINI A, PERUCCACCI S. (2010), *Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts*. Geomorphology, 114, 129-142. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.06.020. R
- SIMU (2017), *Using GIS to determine the energy of relief. Pattern module method*. Pangea, 17, 32-35.
- TARBOTON, D. G. (1997), *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. Water resources research, 33(2), 309-319.
- TRIGILA A., IADANZA C., LASTORIA B., BUSSETTINI M., BARBANO A. (2021), *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2021*. ISPRA, Rapporti 356/2021
- WILLGOOSE, G. R., & HANCOCK, G. R. (1998), *Topographic effects on subsurface flow using a digital elevation model*. Water Resources Research, 34(3), 505-516.

RIFERIMENTI WEB

- Rif. WEB n. 1 - <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/suolo-e-territorio/dissesto-idrogeologico/le-alluvioni>
- Rif. WEB n. 2 - <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/index.html>

Geological day Coste. Una giornata di escursione e di approfondimento geologico ambientale

Geological day Coasts. A day of excursion and environmental geological study

Parole chiave: Erosione costiera, Geological day, monitoraggio delle coste, Salvaguardia e Pianificazione sostenibile dei litorali

Key words: Coastal erosion, Geological day, coastal monitoring, Conservation and sustainable planning of the coasts

Aleandro Tinelli, Eugenio Di Loreto,
Giuseppe Gisotti, Guido Paliaga,
Francesco Stragapede, Piero Tinelli
SIGEA - APS
E-mail: aleandro.tinelli@gmail.com

Elaborazione informatica
Dr. Massimiliano Gamba

INTRODUZIONE

Il Litorale è stato definito come “il territorio, che segna il confine fra la terra e il mare, ed un luogo di compromesso e di conflitto in continua evoluzione”. In Italia, il 13% della superficie nazionale pari a 43.000 kmq si trova sulle coste marine. Il Litorale italiano è il quinto più lungo in Europa, con 8300 km. In questo territorio, in cui si sono sviluppati ben 646 comuni, si registra il maggior peso demografico dell'intero bacino del Mediterraneo. All'avvicinarsi della stagione estiva il fenomeno dell'erosione costiera dei litorali, torna ad interessare l'opinione pubblica. Le coste negli ultimi 30 anni, sono state esposte a intensi fenomeni erosivi (circa 1170 km), aumentati sensibilmente in frequenza e intensità, che hanno provocato effetti spesso catastrofici, con ingenti danni all'economia turistica e alle infrastrutture. L'equilibrio fisico dell'ambiente costiero, già tanto precario e difficile, finisce con l'essere sempre più turbato dalla pressione antropica (Gisotti, 2000). I processi di modifica dei litorali sono dovuti in parte a fenomeni naturali, come il mareggiate e azione del vento, ed in parte ai processi di trasformazione e di sfruttamento da parte dell'uomo per realizzare infrastrutture, insediamenti turistici. Tale distinzione, oggi, appare ancor più rilevante al fine di comprendere gli sviluppi che hanno profondamente modificato le nostre coste e certamente, in questi ultimi decenni, cambiato l'aspetto di gran parte del territorio. Ai processi naturali di più largo respiro, l'uomo ha contrapposto una costante ed incisiva azione volta ad adeguare le coste italiane alle sue esigenze. Tutto questo, accompagnato da informazioni carenti o inadeguate ed una scarsa attenzione alla corretta pianificazione delle unità fisiografiche ambientali delle coste. Nelle “Linee Guida Nazionali per la difesa

della costa dai fenomeni di erosione e dagli effetti dei cambiamenti climatici” del Tavolo nazionale “Erosione Costiera” (MATTM-Regioni, 2018) vengono raccomandati interventi volti in primo luogo al riequilibrio idrodinamico della corrente di fondo, finalizzati a ristabilire la naturale resilienza delle spiagge. Sono invece troppo spesso stati realizzati interventi di protezione dei litorali, con opere rigide artificiali e di ripascimento, che hanno prodotto risultati scadenti o addirittura peggiorato i fenomeni erosivi, con enorme spreco della risorsa pubblica e con impatti ambientali e paesaggistici devastanti.

In occasione della ricorrenza dei 30 anni della propria fondazione (il 18 maggio 1992), il gruppo di lavoro della SIGEA APS ha proposto a tutti i soci e simpatizzanti l'iniziativa “Geological DAY Coste”, una giornata dedicata al monitoraggio delle aree costiere, che si è svolta nella settimana tra il 18 e il 24 maggio 2022. Tale iniziativa ha avuto lo scopo di documentare le condizioni degli ambienti naturali o semi naturali più significativi, dove ancora è possibile trovare dei riferimenti utili per cogliere i cambiamenti avvenuti e le potenzialità di recupero. La stagione primaverile permette di constatare i danni delle mareggiate e delle perturbazioni meteorologiche invernali e di verificare l'incidenza delle attività antropiche legate alla stagione balneare di fruizione delle spiagge. Questo, anche con l'obiettivo di salvaguardare subito, ogni scampolo di ambiente ancora poco contaminato e/o dove sia ancora presente una certa capacità della natura di recuperare gli originari processi naturali e contrastare la sempre più ridotta naturalità delle nostre coste e la conseguente perdita di biodiversità. Scopo finale dell'iniziativa è quello di contribuire con dati significativi alla protezione, al recupero ed al migliora-

mento della biodiversità presente nelle aree costiere prese a riferimento. Da qui la necessità di tutelare gli ambienti residui, anche di piccole dimensioni, spesso coincidenti con aree protette o per renderli disponibili per la comunità (spiagge libere). Un progetto di monitoraggio dei processi in atto che può andare a rafforzare le forme di salvaguardia naturali e che può sensibilizzare e stimolare l'opinione pubblica a preservare queste aree per le generazioni future.

I soci SIGEA a titolo volontario, hanno eseguito sopralluoghi e rilievi di carattere geologico ambientale, presso alcune spiagge o tratti di costa significativi, utilizzando un'apposita scheda, disponibile online sul sito web dell'Associazione. I rilievi, coordinati da Sette sezioni regionali della SIGEA (Calabria, Lazio, Liguria, Marche, Puglia, Sicilia, Toscana), hanno consentito di realizzare una prima banca dati di monitoraggio sullo stato di 26 tratti di coste, che potrà essere aggiornata annualmente. Il metodo utilizzato è indispensabile per osservare le variazioni periodiche dovute ad interventi antropici o naturali nell'arco del tempo. Tornando infatti a distanza di tempo sul posto sarà possibile confrontare i dati delle precedenti osservazioni rilevate. Le schede debitamente compilate, sono corredate da cartografie e foto emblematiche sullo stato del litorale esaminato.

Questa iniziativa rientra tra le attività di informazione e sensibilizzazione svolte da SIGEA per diffondere e favorire, tra la popolazione, la comprensione del ruolo della spiaggia come ambiente naturale e di sviluppo sostenibile di attività economiche e turistiche al fine di promuovere iniziative di tutela e valorizzazione del territorio, per una pianificazione partecipativa, anche alla luce delle recenti proposte di Legge per la gestione delle aree demaniali. Su que-

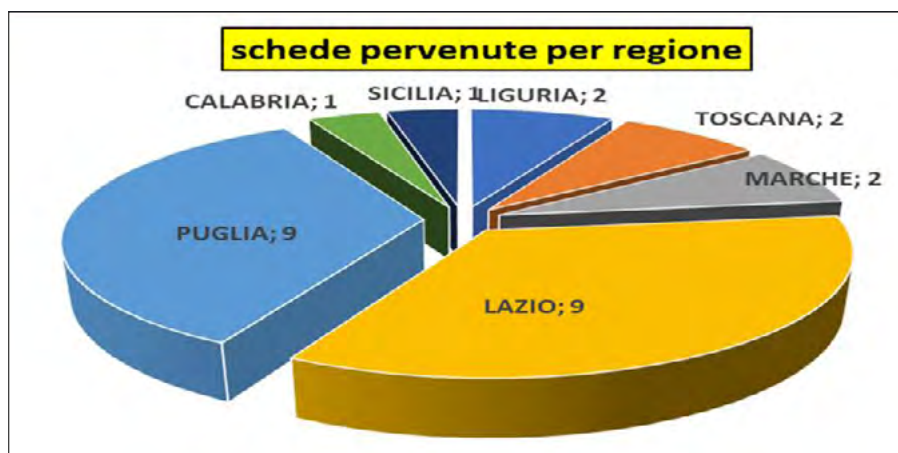


Figura 1. Diagramma a Torta con indicato il numero di schede compilate per le 7 Regioni indagate

ste tematiche la SIGEA ha già svolto numerosi Convegni ed interessanti seminari in diverse regioni italiane (Spilotro, 2008; Fiore et alii, 2014), dedicati al litorale per conoscere la evoluzione storica e geomorfologica nel tempo di queste zone e discutere sugli interventi strutturali (opere rigide, pennelli, barriere frangiflutti, ripascimenti, ecc.) e non strutturali (codice delle buone pratiche per la pulizia degli arenili, delimitazione di aree destinate alla ricostituzione delle dune costiere...) da realizzare a difesa delle spiagge per una gestione sostenibile del territorio. Una gestione delle zone costiere incentrata sulla sostenibilità può avere successo solo adottando una serie completa di strumenti giuridici ed economici, accordi, distribuzione di informazioni, soluzioni tecnologiche, ricerca, istruzione e formazione, così come già previsto in diversi documenti strategici adottati dalla Commissione Europea e dal Parlamento Europeo per una "Gestione Integrata delle Zone Costiere".

ANALISI DELLE SCHEDE DI MONITORAGGIO GEOLOGICO-AMBIENTALE

Viene descritta di seguito l'analisi dei dati ricavati dalle schede di monitoraggio geologico-ambientale redatte in occasione dell'evento "Geological Day Coste". Per la stesura della scheda si è fatto riferimento ad elementi ripresi da studi bibliografici (ARPA Lazio, 2019; ISPRA, 2019). Le schede compilate sono state inviate al seguente indirizzo mail: eventi@sigeaweb.it. Ogni scheda di monitoraggio del sito esaminato si compone di cinque riquadri così suddivisi:

- G.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE, in cui sono indicati i dati relativi all'ubicazione e al contesto geomorfologico e ambientale del sito esaminato. Nel riquadro G1 sono stati previsti campi con libera descrizione da parte del compilatore.

- G.2 QUADRO DI SINTESI DELLE VARIAZIONI ANTROPICHE INTERFERENTI, nella quale sono indicate 15 possibili tipologie di interventi antropici significativi, che possono determinare situazioni di vulnerabilità nel tratto di costa indagato.
- G.3 PARAMETRI PRIORITARI DI MONITORAGGIO, suddivisi in:
 - Processi antropici (interventi diretti con modifica dello stato dei luoghi)
 - Processi naturali (tendenze naturali prevalenti)
- G.4 SCHEDA DI RILEVAMENTO DAL SITO PRESO A RIFERIMENTO, in questa sezione sono segnalati: alcuni caratteri geomorfologici e sedimentologici; la presenza di elementi di naturalità legati agli aspetti floristico vegetazionali; la presenza di specie vegetali esotiche, di opere antropiche di difesa della costa, e depositi di rifiuti.

Per semplificare la compilazione dei riquadri G2, G3 e G4 è stato richiesto di rispondere ad una serie di domande (per lo più a risposta chiusa: SI/NO).

- G.5 OSSERVAZIONI GUIDATE, in questa parte finale della scheda il rilevatore deve descrivere alcune informazioni in forma sintetica, relative a:
 - Attività antropiche presenti (Spiaggia libera attrezzata, ristoranti, stabilimenti, chioschi);
 - Danni ambientali per inquinamento o interventi di ripulitura della spiaggia con l'utilizzo di trattori; Inquadramento paesaggistico;
 - Descrizione della vegetazione;
 - Valutazione dello stato ecologico della costa.

Sono segnalati inoltre tutti gli elementi utili alla rilettura dello stato dei

luoghi per procedere ad un successivo monitoraggio nel tempo. Sono state infine allegate delle Fotografie, il cui punto di ripresa è stato rappresentato su Cartografia dell'area, in scala adeguata. Le informazioni riportate nel riquadro G5 sono fondamentali per poter agevolmente osservare, nell'arco del tempo, variazioni dovute ad interventi antropici o ad eventi naturali. Questo consentirà ad un rilevatore che torna sul posto di poter rileggere le medesime osservazioni precedentemente rilevate.

PRINCIPALI DATI QUANTITATIVI

In totale sono pervenute 26 schede di altrettanti siti, in 7 diverse Regioni (Fig. 1). Le stesse schede sono state compilate da 14 rilevatori e/o gruppi distinti (per il conteggio si è fatto riferimento alla mail indicata da ciascun gruppo/segnalatore). A livello territoriale, facendo riferimento al Riquadro G1, il numero più elevato di schede è pervenuto da 2 regioni (Lazio e Puglia), che da sole hanno contribuito al 69% del risultato globale.

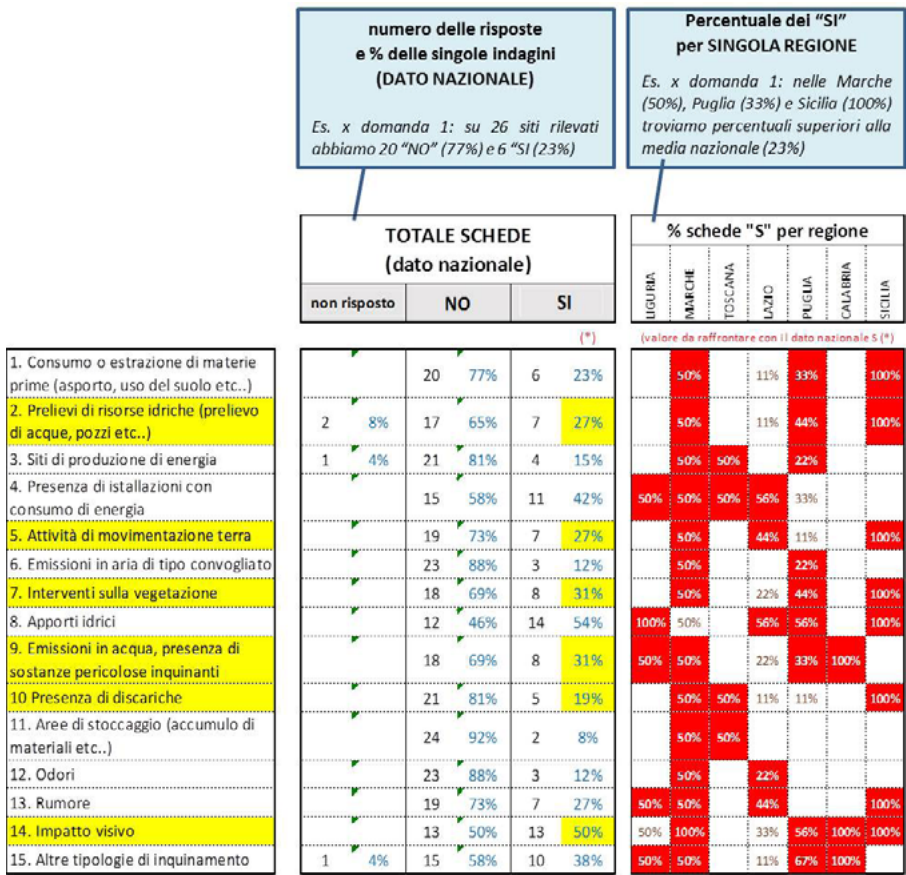
Le 26 schede hanno avuto ad oggetto rilevazioni nei tratti costieri di 18 diversi comuni nelle sette Regioni indagate, come desumibile dalla Tab. 1.

Tabella 1. Numero delle schede rilevate, suddivise per Regioni e Comuni

Regione	Numero schede	Numero comuni
Liguria	2	2
Marche	2	1
Toscana	2	1
Lazio	9	5
Puglia	9	7
Calabria	1	1
Sicilia	1	1
Totale	26	18

ASPETTI ANTROPICI INTERFERENTI CON I SITI MONITORATI

Questa parte della scheda, G.2, ha ricostruito il quadro di sintesi delle situazioni ambientali interferenti con l'ambiente costiero. Le informazioni fornite per i 26 siti oggetto di indagine sono state raggruppate a livello nazionale e regionale (Figg. 2 e 3). Il rilevatore poteva rispondere semplicemente con un "SI" o con un "NO" (in alcuni casi, tuttavia, non è stata data risposta). Le tematiche di maggior interesse sono state evidenziate in giallo. I dati evidenziati



sono rivolti soprattutto a spiagge sabbiose (92%), nelle quali è stata segnalata la presenza di dune costiere (58%) ma anche di specie invasive (31%).

Si può notare l'elevato livello di fruizione da parte dell'uomo (96%), soprattutto nelle aree con elementi di naturalità (92%). Una notevole presenza di fenomeni erosivi diffusi (85%) anche

laddove esistono opere di difesa della costa (54%).

I dati evidenziati in rosso mettono in risalto - per singola regione - situazioni peggiori rispetto alla media totale, pur avendo preso in considerazione aree a forte connotazione ecologica. Nelle zone tutelate si possono osservare (Fig. 7) percentuali molto alte relativamente alla

fruizione pubblica (95%), ai fenomeni erosivi (89%) ed alla presenza di specie invasive (32%).

STATO ECOLOGICO QUALITATIVO DEI SITI OGGETTO DELL'INDAGINE

All'interno del Riquadro G.5, della scheda di rilevamento era prevista una domanda diretta a valutare lo stato ecologico della costa. Limitatamente a questa domanda, ciascun compilatore ha avuto la possibilità di esprimere sinteticamente il proprio giudizio: Positivo (indicato in verde), Intermedio (indicato in grigio), Negativo (indicato in rosso). Nella rappresentazione grafica (Fig. 8) le aree sono state raggruppate per mettere in risalto la qualità dei siti.

Dall'analisi dei risultati dei questionari raccolti (Fig. 9) è possibile desumere che:

- il 50% dei siti rilevati presenta uno stato ecologico della costa POSITIVO
- il 38% si trova in una situazione INTERMEDIA
- il 12% presenta una situazione NEGATIVA.

Da notare che dei 26 siti oggetto dell'indagine, ben 19 (pari quindi al 73%) hanno interessato "Aree di Tutela". I rilevatori si sono quindi principalmente indirizzati su Aree Tutate, lasciando in secondo piano le aree non protette, che invece più di altre avrebbero bisogno di un monitoraggio sistematico per evidenziare l'impatto antropico sulle spiagge causato soprattutto dalle attività per la balneazione.

Le schede relative alle Aree Tutate hanno messo in risalto un dato anomalo: ci si aspetterebbe infatti un miglioramento della qualità dei siti rilevati, e quindi un giudizio prevalentemente positivo; al contrario, i numeri ci offrono una verità diametralmente opposta:

- Le aree definite in "condizioni NEGATIVE" passano infatti dal 12% (quando consideriamo tutti i siti) al 16% (quando ci limitiamo a considerare solo i siti in Zona di Tutela).
- Lo stesso dicasi per le aree in "condizione INTERMEDIE", che passano dal 38% al 42%.
- Si riducono le aree in "condizioni POSITIVE", che scendono dal 50% al 42%.

In sintesi, i siti nelle Aree Tutate non presentano caratteristiche ambientali totalmente positive, ma sono oggetto di problematiche negative che impattano sugli equilibri ecologici.

Va detto che il campione (26 siti) non è sufficientemente ampio da poter trarre

		totale 26 schede			% schede "S" per regione							
		non risposto	NO	SI	LIGURIA	MARCHE	TOSCANA	LAZIO	PUGLIA	CALABRIA	SICILIA	
G3.A. PROCESSI ANTROPICI (interventi diretti con modifica dello stato dei luoghi)	1. Saltuario (mensile, stagionale)	2	8%	10	38%	14	54%	100%	50%	89%	22%	100%
	2. Sistemático (continuativo)	3	12%	16	62%	7	27%	50%	50%	22%	11%	100%
	3. Legato all'uso del territorio	2	8%	11	42%	13	50%	100%	50%	33%	56%	100%

		totale 26 schede			% schede "S" per regione							
		non risposto	NO	SI	LIGURIA	MARCHE	TOSCANA	LAZIO	PUGLIA	CALABRIA	SICILIA	
G3.B. PROCESSI NATURALI (tendenze naturali prevalenti)	1. Apporto di sedimenti dai corsi d'acqua limitrofi	1	4%	15	58%	10	38%	100%	100%	56%	11%	100%
	2. Correnti marine			3	12%	23	88%	50%	100%	100%	89%	100%
	3. Mareggiate			2	8%	24	92%	50%	100%	100%	100%	100%
	4. Azione del vento			1	4%	25	96%	50%	100%	100%	100%	100%
	5. Colonizzazione di specie vegetazionali			7	27%	19	73%	50%	100%	89%	78%	100%

Figura 4. Confronto tra Dati totali e regionali, relativi ai processi antropici e naturali

		totale 26 schede			19 schede in zone di tutela		
		non risposto	NO	SI	non risposto	NO	SI
G3.A. PROCESSI ANTROPICI (interventi diretti con modifica dello stato dei luoghi)	1. Saltuario (mensile, stagionale)	2	8%	10	38%	14	54%
	2. Sistemático (continuativo)	3	12%	16	62%	7	27%
	3. Legato all'uso del territorio	2	8%	11	42%	13	50%
G3.B. PROCESSI NATURALI (tendenze naturali prevalenti)	1. Apporto di sedimenti dai corsi d'acqua limitrofi	1	4%	15	58%	10	38%
	2. Correnti marine			3	12%	23	88%
	3. Mareggiate			2	8%	24	92%
	4. Azione del vento			1	4%	25	96%
	5. Colonizzazione di specie vegetazionali			7	27%	19	73%

Figura 5. Confronto tra i dati totali e quelli delle 19 aree tutelate, relativi ai processi antropici e naturali

Dato totale e dato regionale in percentuale per regione		totale 26 schede			% schede "S" per regione						
		non risposto	NO	SI	LIGURIA	MARCHE	TOSCANA	LAZIO	PUGLIA	CALABRIA	SICILIA
SCHEDA DI RILEVAMENTO DAL PUNTO PRESO A RIFERIMENTO	1. Profondità della spiaggia dalla battigia	3	12%	10	38%	4	15%	9	35%	10	38%
	2. Altimetria	10	38%	7	27%	6	23%	3	12%	1	4%
	3. Fruizione pubblica e accessibilità	1	4%	25	96%	2	8%	24	92%	4	15%
	4. Elementi di naturalità	4	15%	22	85%	6	23%	20	77%	19	73%
	5. Fenomeni erosivi	19	73%	7	27%	22	85%	4	15%	12	46%
	6. Deposito dal mare di sabbie	12	46%	14	54%	11	42%	15	58%	1	4%
	7. Presenza di rifiuti	11	42%	15	58%	1	4%	17	65%	8	31%
	8. Inquinamento	1	4%	17	65%	8	31%	17	65%	8	31%
	9. Opere di difesa della costa	19	73%	7	27%	14	54%	12	46%	2	8%
	10. Presenza di dune costiere	14	54%	12	46%	16	62%	10	38%	20	77%
	11. Presenza di piante pioniere (Galkileto, Ammophila arenaria etc.)	2	8%	24	92%	1	4%	17	65%	8	31%
	12. Presenza di specie invasive (Agave, Carpobotus, etc.)	1	4%	17	65%	8	31%	17	65%	8	31%
	13. Presenza a mare di massi naturali affioranti	19	73%	7	27%	14	54%	12	46%	2	8%
	14. Depositi di alghe e Posidonia oceanica	14	54%	12	46%	16	62%	10	38%	20	77%
	15. Spiaggia sabbiosa	2	8%	24	92%	1	4%	17	65%	8	31%
	16. Spiaggia di ciottoli	16	62%	10	38%	20	77%	6	23%		
	17. Costa rocciosa	20	77%	6	23%						

Figura 6. Dati relativi ai caratteri geomorfologici e sedimentologici; alla presenza di elementi di naturalità vegetazionali; e alla presenza di opere antropiche ed interventi di modifica dello stato dei luoghi

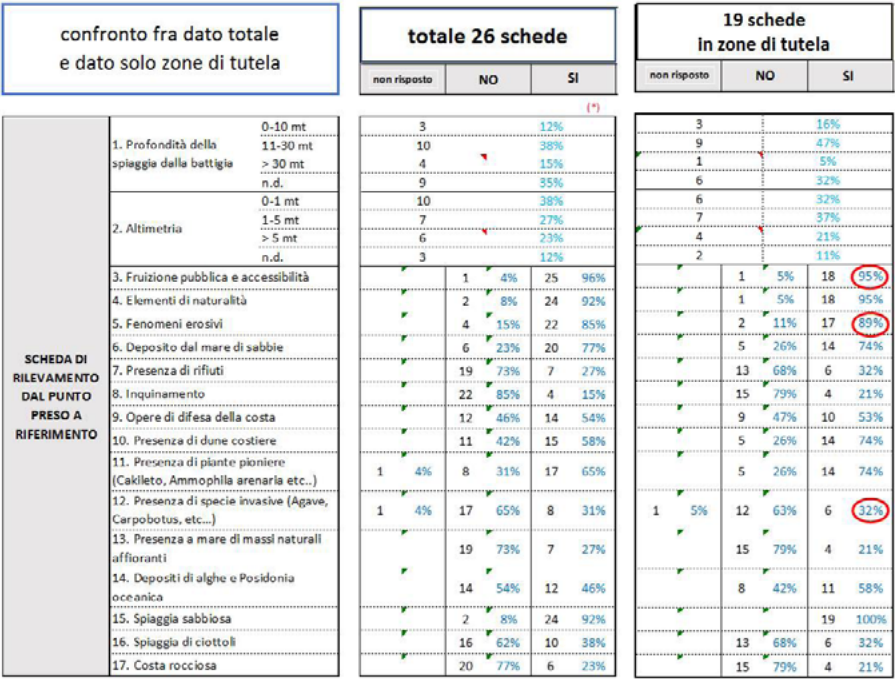


Figura 7. Confronto tra i dati totali relativi al rilevamento dei caratteri ambientali e antropici dei luoghi esaminati con quelli delle 19 schede censite in zone di tutela

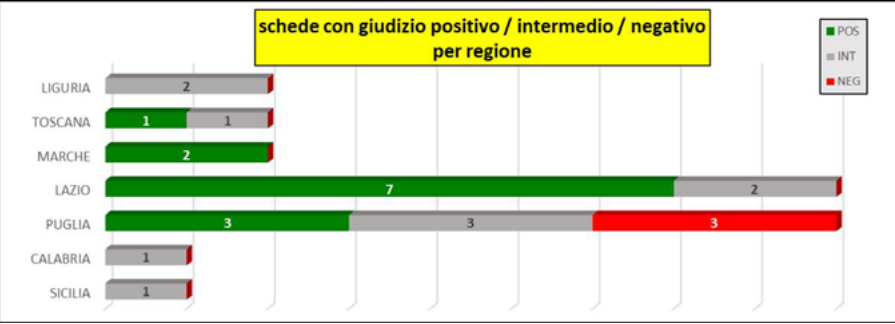


Figura 8. Grafico a barre, a tre colori rappresentativi dei diversi gradi dello stato ecologico della costa per le singole regioni

REGIONE	nr. schede pervenute				nr. schede in zone di tutela			
	POS	INT	NEG	TOT	POS	INT	NEG	TOT
LIGURIA		2		2	8%			
TOSCANA	1	1		2	8%			
MARCHE	2			2	8%			
LAZIO	7	2		9	35%			
PUGLIA	3	3	3	9	35%			
CALABRIA		1		1	4%			
SICILIA		1		1	4%			
TOTALE	13	10	3	26	50%	38%	12%	
					42%	42%	16%	73%

Figura 9. Dati regionali (Totali e delle zone di Tutela) relativi alla valutazione dello stato ecologico del tratto di costa indagato

delle conclusioni; ciò nonostante le prime indicazioni non sono confortevoli, e proprio per questo sarebbe auspicabile comprendere meglio il fenomeno attraverso una indagine più allargata, estesa ad un maggiore numero di siti.

CONCLUSIONI

Nonostante il limitato numero delle schede raccolte ed il parziale coinvolgimento delle Sezioni Regionali di SIGEA, riteniamo di segnalare una realtà preoccupante, soprattutto nei siti investigati nelle aree protette. In particolare

la diffusa presenza di attività antropiche legate alla fruizione pubblica. Da rimarcare inoltre la presenza fenomeni erosivi diffusi, provocati sia da fenomeni naturali che dall'azione dell'uomo.

Si impongono pertanto riflessioni ed attenzioni specifiche per evitare che tali processi negativi possano continuare nel tempo, peggiorando le condizioni che sono state rilevate così delicate.

La "transizione ambientale" a cui saranno soggetti i territori costieri richiede scelte sostenibili dal punto di vista ambientale, economico, sociale e

generazionale, investendo non solo sulle aree da difendere ma forse ragionando anche su quelle eventualmente da abbandonare. In diversi paesi del mondo: Australia, Cina, Giappone, Gran Bretagna, Irlanda, Stati Uniti e Sud Africa, si predispongono piani di Arretramento strategico, con la partecipazione attiva dei cittadini, che sono informati ma anche formati.

In particolare si riscontra la necessità di interventi mirati a contrastare i processi di alterazione ed al contempo predisporre azioni di riqualificazione ambientale per migliorare lo stato naturale delle nostre spiagge.

Questo è il primo monitoraggio effettuato dai Soci di alcune sezioni regionali di SIGEA, ci auguriamo che sia un punto di partenza per ripetere questa esperienza nei prossimi anni sia con il monitoraggio delle aree già indagate sia in altri siti per disporre di un numero maggiore di dati conoscitivi sullo stato degli ambienti costieri, particolarmente vulnerabili e seriamente minacciati.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano per il contributo dato nel rilevamento delle schede i soci: Baldi, Belleggia, Di Ceglie, Elia, Gruvosin, Lopez, Morelli, Osso, Perazzo, Pistolesi, Tomaselli.

BIBLIOGRAFIA

ARPA LAZIO (2019), *Acque marine costiere del Lazio: qualità impatti, balneabilità*, Report 07.

GISOTTI G. (2012), *Il dissesto idrogeologico. Previsione, prevenzione e mitigazione del rischio*. Flaccovio Ed., Collana SIGEA di Geologia Ambientale.

ISPRA - RAPPORTI 215/2015, *Gli habitat delle coste sabbiose italiane: ecologia e problematiche di conservazione* (<https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/gli-habitat-delle-coste-sabbiose-italiane-ecologia-e-problematiche-di-conservazione>).

MATTM-REGIONI (2018), *Linee Guida per la Difesa della Costa dai fenomeni di Erosione e dagli effetti dei Cambiamenti climatici*. Documento elaborato dal Tavolo Nazionale sull'Erosione Costiera tra MATTM e Regioni con il coordinamento tecnico di ISPRA, 305 pp

SPILOTRO G. (a cura di) (2008), *L'arretramento della Costa Ionica della Basilicata: complessità, studi e azioni*. In Atti del Convegno del 26 maggio 2006 a Metaponto (MT). Supplemento di Geologia dell'Ambiente 2/2008.

FIGLIORE A., LOPEZ R., VALLETTA S., (a cura di) (2014), *Le coste Pugliesi: tra prospettive di sviluppo ed esigenze di tutela*. In Atti del workshop di Monopoli del 18 gennaio 2013. Supplemento a Geologia dell'Ambiente 2/2014.



📍 Via Bulgarini 125, 00019 Tivoli (Roma)

☎ +39 340 5236660

✉ info@fralerighe.it

🌐 www.fralerighe.it

FRALERIGHE BOOK FARM

EDITORIA | WEB | MULTIMEDIA

Fralerighe Book Farm è un service editoriale che mette competenza e professionalità al servizio di chi pubblica e scrive. Per gli editori e per gli autori, **Fralerighe Book Farm** è specializzato nella cura redazionale dei testi, con l'obiettivo di mettere la tecnologia a disposizione del libro, seguendo tutta la filiera di lavorazione testuale e grafica della stampa e del digitale sfruttando al meglio le potenzialità di ciascun supporto, dall'editing all'impaginazione, senza tralasciare la correzione di bozze e la traduzione.

La **redazione** e l'**ufficio grafico** offrono i seguenti servizi sia per volumi sia per riviste:



Progettazione e impaginazione di libri, riviste, cataloghi di qualsiasi formato e tipologia. Servizi per le case editrici, definizione linea editoriale, estensioni multimediali di libri cartacei, ideazione e impostazione grafica, redazione dei contenuti



Realizzazione ebook professionali pronti per essere pubblicati, acquistati e letti



Web design, sviluppo siti internet, portali, blog, e-commerce



Creazione di logo/branding, corporate identity, restyling di loghi e siti internet, creazione di layout landing page



Soluzioni web, consulenza tecnica, gestione dominio



Creazione e gestione di newsletter



Ideazione e realizzazione di campagne promozionali, email marketing, banner, brochure, flyers, spot pubblicitari



Comunicazione digitale e Social Media Strategy per la creazione, la crescita e la cura della community e del pubblico di riferimento dell'azienda



Servizi SEO, posizionamento nei motori di ricerca



FRALERIGHE
EDIZIONI

“LA MACCHINA TECNOLOGICAMENTE PIÙ EFFICIENTE CHE L'UOMO ABBA MAI INVENTATO È IL LIBRO”
[NORTHROP FRYE]

Fralerighe Edizioni è una casa editrice indipendente, interculturale e sociale che vuole essere laboratorio di incontri e di sperimentazione per contribuire alla costruzione di una società plurale equa e positiva. Nasce valorizzando le nuove forme di pubblicazione tra la carta e il digitale, dal libro tradizionale a quello formativo denominato mediabook. La linea editoriale è caratterizzata da argomenti di rilevanza sociale attraverso le collane dedicate:

- Fralerighe eBook
- GiraMondo
- LabCult
- Luoghi Tradizioni Relazioni
- MeltingPot
- Poesia
- Narrativa
- Teatro
- Guide Geoarcheologiche d'Italia



Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

www.sigeaweb.it

5X1000



Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

Aiutaci a promuovere
la **CULTURA GEOLOGICA**
e la **TUTELA DELL'AMBIENTE**

DESTINA IL

CINQUE X MILLE ALLA SIGEA-APS

C.F. 04336801008



Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

www.sigeaweb.it - info@sigeaweb.it