

# Georischi marini nel Mediterraneo: dinamiche, impatti e strategie per una gestione sostenibile dell'economia blu

Francesco L. Chiocci

Università di Roma 'La Sapienza', Dipartimento di Scienze della Terra  
Email: francesco.chiocci@uniroma1.it

## Riassunto

I fondali marini costituiscono l'ultima frontiera inesplorata del pianeta, un ambiente dove si intrecciano processi geologici attivi, interessi economici crescenti e vulnerabilità spesso sottovalutate. Questo articolo offre un excursus sui principali georischi che caratterizzano il bacino Mediterraneo, esaminandone le cause fisiche, gli effetti osservati e le implicazioni per la sicurezza delle comunità costiere e delle infrastrutture critiche.

Attraverso un approccio multidisciplinare che combina geologia marina, oceanografia fisica e analisi del rischio, vengono presentati casi studio emblematici - dal collasso del fianco meridionale di Ischia alle ricorrenti instabilità dello Stromboli, ai canyon sottomarini calabresi - che dimostrano come eventi di media e piccola scala possano generare impatti cumulativi molto significativi.

Per la mitigazione occorrerebbe superare le attuali carenze nella governance del rischio marino e proporre un quadro strategico che migliori l'interfaccia tra ricerca scientifica e processi decisionali nell'era dell'economia blu.

**Parole chiave:** georischi marini, frane sottomarine, maremoti, ecoscandaglio multifascio multi-beam, pericolosità geologica, Mediterraneo, economia blu.

## Abstract

The sea floor is the last unexplored frontier of our planet, an environment where active geological processes, increasing economic interests and often-underestimated vulnerabilities converge. This paper provides an overview of the major geohazards characterizing the Mediterranean basin, analyzing their physical causes, observed impacts, and implications for the safety of coastal communities and critical infrastructure.

Through a multidisciplinary approach combining marine geology, physical oceanography, and risk analysis, emblematic case studies are presented—including the collapse of Ischia's southern flank, the recurrent instabilities of Stromboli, and on the Calabrian submarine canyons -demonstrating how medium- and small-scale events can generate significant cumulative impacts.

Effective mitigation requires addressing the current deficiencies in marine risk governance and developing a strategic framework to enhance the interface between scientific research and decision-making processes in the era of the blue economy.

**Keywords:** marine georisks, submarine landslides, tsunamis, multibeam echosounder, geological hazard, Mediterranean, blue economy.

## Introduzione

Il bacino Mediterraneo rappresenta un ambiente particolarmente idoneo per lo studio dei processi geologici marini.

Formatasi attraverso complesse interazioni tra la placca africana e quella euroasiatica, questa regione mostra una varietà eccezionale di contesti tettonici e morfologici in uno spazio relativamente ristretto. La convergenza tra le placche, che procede ad una velocità media di circa 5 mm/anno (Serpelloni et al., 2007), genera una sismicità diffusa e una marcata instabilità dei margini continentali, con pendii spesso prossimi all'angolo di riposo dei sedimenti.

A differenza degli oceani, dove i processi geologici sono generalmente più lenti e distribuiti su scale spaziali maggiori, il Mediterraneo presenta una concentrazione di fenomeni geologici attivi che lo rendono particolarmente vulnerabile a processi rapidi e eventi improvvisi. Questa peculiarità, combinata con l'elevata densità abitativa delle sue coste (oltre 150 milioni di persone vivono nei paesi rivieraschi secondo UNEP-MAP, 2020), crea una situazione di rischio unica che richiede approcci specifici di conoscenza, monitoraggio e mitigazione.

Per quel che riguarda la nostra conoscenza dell'ambiente marino, nonostante i significativi progressi nelle tecnologie di esplorazione marina, ad oggi conosciamo molto meglio la superficie dei pianeti del sistema solare che i fondali della Terra. Il progetto internazionale Seabed 2030, lanciato nel 2017 con l'obiettivo di mappare l'intero fondale oceanico entro la fine del decennio, indica come al 2023 solo il 23,4% dei fondali globali sia stato cartografato con risoluzione adeguata (Mayer et al., 2023). Nel Mediterraneo, questa percentuale è leggermente superiore (circa 35%), ma con marcate disomogeneità tra le diverse sottoregioni (Fig. 1).

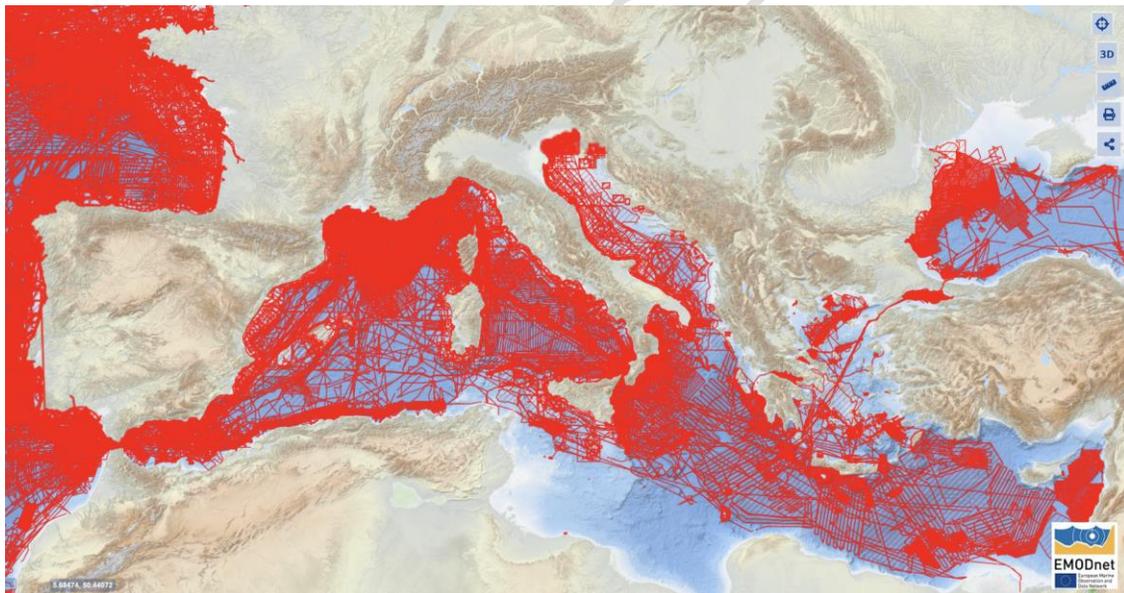


Figura 1. Copertura dei dati batimetrici nel Mediterraneo, dal database Emodnet (<https://emodnet.ec.europa.eu/>)

I motivi di questa scarsa conoscenza derivano dalla natura stessa dell'ambiente marino: l'acqua di mare assorbe rapidamente la luce e altre radiazioni elettromagnetiche, rendendo inefficaci le tecniche di telerilevamento che invece sono lo strumento principale di mappatura nell'ambiente subaereo. Solo l'energia acustica riesce a penetrare la massa acqua, anche se le portate sono limitate e la propagazione del suono è influenzata da temperatura, salinità e pressione, richiedendo complesse correzioni. Le campagne oceanografiche con navi attrezzate hanno costi che possono superare i

50.000 € al giorno, con coperture spaziali di decine o centinaia di km<sup>2</sup> (in funzione delle profondità, Fig. 2) e tali risorse limitano fortemente la possibilità di esplorare un ambiente così vasto.

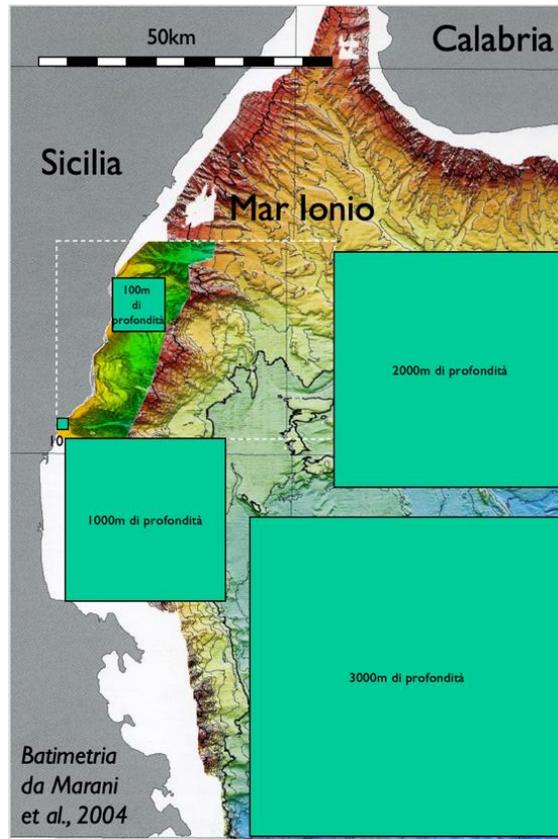


Figura 2. Copertura giornaliera per rilievi multibeam, in funzione della profondità.

L'economia blu, intesa come l'insieme delle attività economiche legate agli oceani, ai mari e alle coste, sta conoscendo una crescita senza precedenti nel Mediterraneo.

Secondo la Commissione Europea (2022), il valore aggiunto lordo annuo generato dall'economia blu nei paesi mediterranei UE ha superato i 180 miliardi di euro, con tassi di crescita superiori al 3% annuo. Questo sviluppo coinvolge settori tradizionali, come la pesca e il trasporto marittimo, ma anche attività emergenti, come l'energia offshore, l'acquacoltura intensiva e il turismo costiero.

Tuttavia, questa espansione economica usualmente procede senza un'adeguata valutazione dei rischi geologici connessi. L'installazione di infrastrutture critiche (porti, piattaforme petrolifere, cavi sottomarini) in aree geologicamente attive crea nuove vulnerabilità che devono essere attentamente valutate. L'eruzione sottomarina del vulcano Hunga Tonga-Hunga Ha'apai nel 2022, che ha causato danni per oltre 90 milioni di dollari alle infrastrutture di comunicazione nel Pacifico (Cronin et al., 2023), rappresenta un monito per il Mediterraneo, dove analoghi fenomeni sono avvenuti nel passato e potrebbero avvenire nel futuro, con impatti ancora maggiori data la maggiore densità di infrastrutture.

Questo articolo si propone di fornire una revisione dei principali georischi marini nel Mediterraneo, con particolare attenzione ai meccanismi genetici e alle relazioni con i processi tettonici e vulcanici regionali, presentare casi studio dettagliati che illustrino le interazioni tra processi naturali e attività antropiche ed infine di analizzare criticamente le attuali strategie di monitoraggio e mitigazione del rischio e proporre un quadro integrato per la gestione sostenibile del rischio geologico marino nell'era dell'economia blu.

## Metodologie di indagine

### *L'ecoscandaglio multifascio multibeam: principio fisico e applicazioni*

L'ecoscandaglio multibeam rappresenta oggi lo strumento principe per l'esplorazione morfologica dei fondali marini. A differenza degli ecoscandagli monofascio tradizionali, che emettono un singolo impulso acustico, i sistemi multibeam utilizzano array di trasduttori che generano contemporaneamente fino a oltre 500 impulsi acustici, disposti a ventaglio lungo una fascia (*swath*) perpendicolare alla rotta della nave (Lurton, 2010).

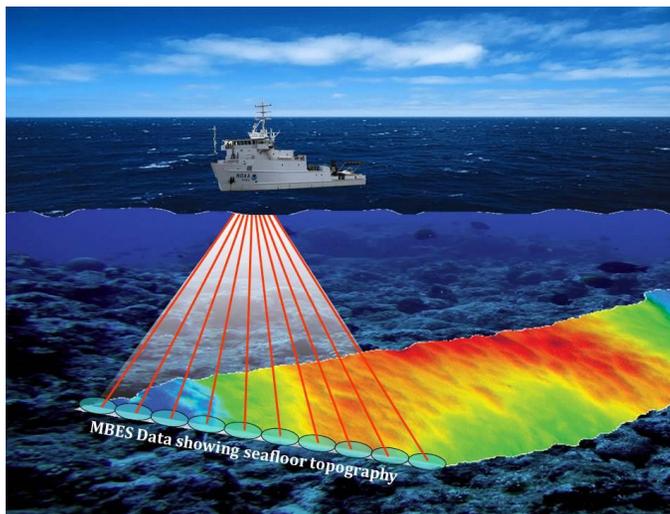


Figura 3. Schema di funzionamento di un ecoscandaglio multifascio multibeam (da Wikipedia.com).

Il principio fisico si basa sulla misura del tempo di arrivo (*two-way travel time*) degli impulsi acustici emessi dalla nave e retrodiffusi dal fondale (Fig. 3). Conoscendo la velocità del suono in acqua (che varia principalmente con temperatura, salinità e pressione secondo l'equazione di Mackenzie, 1981) è possibile convertire questo tempo in una misura di distanza. Conoscendo la distanza percorsa e l'angolo con il quale ciascun impulso è stato emesso, si può localizzare sul fondale ciascun punto di retrodiffusione con le sue coordinate  $x$ ,  $y$  e  $z$  (lat, long e profondità). Si produce così una nuvola di punti che viene poi interpolata per produrre un grigliato di valori di profondità di risoluzione molto alta. I moderni sistemi operano a frequenze comprese tra 12 kHz (per acque profonde) e 700 kHz (per acque costiere), raggiungendo risoluzioni verticali metriche per le acque profonde e centimetriche per le acque superficiali, in condizioni ideali.

Per una caratterizzazione completa dei fondali, il multibeam viene tipicamente integrato con profili di sismica a riflessione che utilizzano sorgenti acustiche ad alta energia per investigare la stratigrafia del sottofondo. La risoluzione verticale (dell'ordine dei metri) è inferiore al multibeam, ma la penetrazione può superare il km in contesti favorevoli.

Anche carotaggi e penetrometri forniscono dati diretti sulle caratteristiche litologiche e sulle proprietà meccaniche dei sedimenti, fondamentali per valutare la stabilità dei pendii, mentre i sismometri e strumenti geodetici sottomarini permettono di rilevare deformazioni e microsismicità precursori di eventi franosi.

Dal punto di vista dell'interpretazione dei dati, occorre segnalare come l'enorme volume di dati prodotto dalle campagne multibeam (fino a diversi TB per giorno di acquisizione) pone sfide significative per l'interpretazione, con tempi molto lunghi. Nel medio-lungo termine algoritmi di *machine learning* potranno essere usati per il riconoscimento di frane, canyon e altre strutture di geohazard (Diesing et al., 2014).

Più in generale, è assolutamente auspicabile l'adozione di standard condivisi per la mappatura, l'archiviazione e lo scambio dei dati.

## Georischii marini: processi e casi studio

Le frane sottomarine nel Mediterraneo sono favorite dall'elevata pendenza dei margini continentali, che in molti settori superano i  $15^\circ$ , valori prossimi all'angolo di riposo dei sedimenti saturi, dagli elevati tassi di sedimentazione dovuti alla geologia attiva con fiumare anche molto piccole che possono trasportare grandi volumi di sedimenti durante eventi estremi ed alla elevata attività sismica di tutta la regione mediterranea.

### *Eventi di dimensioni enormi: il collasso del versante meridionale dell'isola di Ischia*

L'isola vulcanica di Ischia rappresenta uno degli esempi meglio documentati di collasso laterale di un edificio vulcanico in ambiente marino (Fig. 4). La morfologia emersa e sommersa mostra una chiara cicatrice di distacco a forma di ferro di cavallo sul versante meridionale, con una lingua di detrito che si estende per oltre 40 km nel bacino tirrenico. Si tratta di un evento di collasso laterale dell'edificio vulcanico ischitano che provocò una valanga di detrito con blocchi di roccia di dimensioni colossali (centinaia di metri di lato) immerse in una matrice di sedimento sabbioso e fangoso (Chiocci and De Alteriis., 2006). La datazione al radiocarbonio di sedimenti campionati con carotaggi indica che l'evento principale si verificò tra 2.8 e 3.1 ka BP (De alteriis, 2010). La ricostruzione numerica del volume mobilizzato (circa  $5 \text{ km}^3$ ) suggerisce che il maremoto generato abbia raggiunto altezze superiori a 20 m lungo le coste campane (Tinti et al., 2011), un dato coerente con le descrizioni dello scrittore greco Strabone che intorno all'anno 0, riferendo di un evento avvenuto sette secoli prima parla di "acque che si ritirarono per tre stadi (oltre 500 m) prima di riversarsi sull'isola". Questo comportamento (iniziale ritiro delle acque e successivo arrivo dell'onda di sommersione) è per altro tipico dei maremoti generati da frana sottomarina.

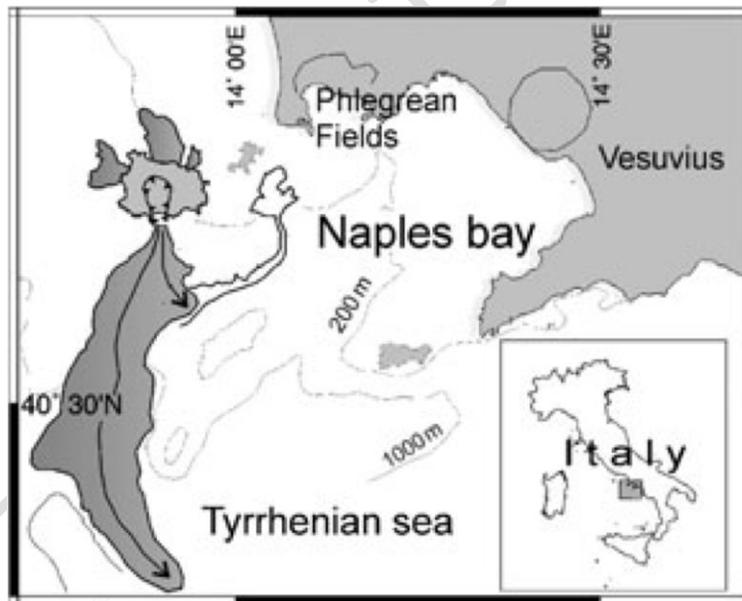


Figura 4. Estensione del debris avalanche di Ischia (da Chiocci e De Alteriis, 2006).

### *Eventi di dimensioni medie: La frana e il maremoto di Stromboli*

L'evento del 30 dicembre 2002 rappresenta un caso emblematico di maremoto generato da frana sottomarina e di evoluzione della stessa sino ad interessare il versante subaereo. Sulla base di ricostruzioni basate su rilevamenti morfobatimetrici, testimonianze sull'arrivo delle onde nell'abitato di Stromboli e modellazioni geotecniche, la successione di eventi fu un iniziale collasso del versante sottomarino della Sciara del Fuoco ( $\sim 5$  milioni di  $\text{m}^3$ ) ed un successivo collasso del versante subae-

reo destabilizzato dalla mancanza al piede della massa sottomarina ( $\sim 7$  milioni di  $m^3$ ). Il detrito scivolò ulteriormente sia le nicchie di frana sia i fondali sottostanti. Come risultato, due treni d'onda distinti raggiunsero Stromboli a sette minuti di distanza uno dall'altro, con run-up massimo di 10.8 m. L'analisi dei dati batimetrici pre- e post-evento (Fig. 5) mostrò un approfondimento di oltre 40 m nella zona di distacco (Chiocci et al., 2008), con spessori di deposito fino a 15 m nella piana batiale adiacente (Marani et al., 2009). Fortunatamente, l'evento occorse in periodo invernale, limitando le vittime. Una simulazione mostra che se lo stesso evento si fosse verificato in luglio avrebbe potuto coinvolgere centinaia di turisti che d'estate affollano le spiagge.

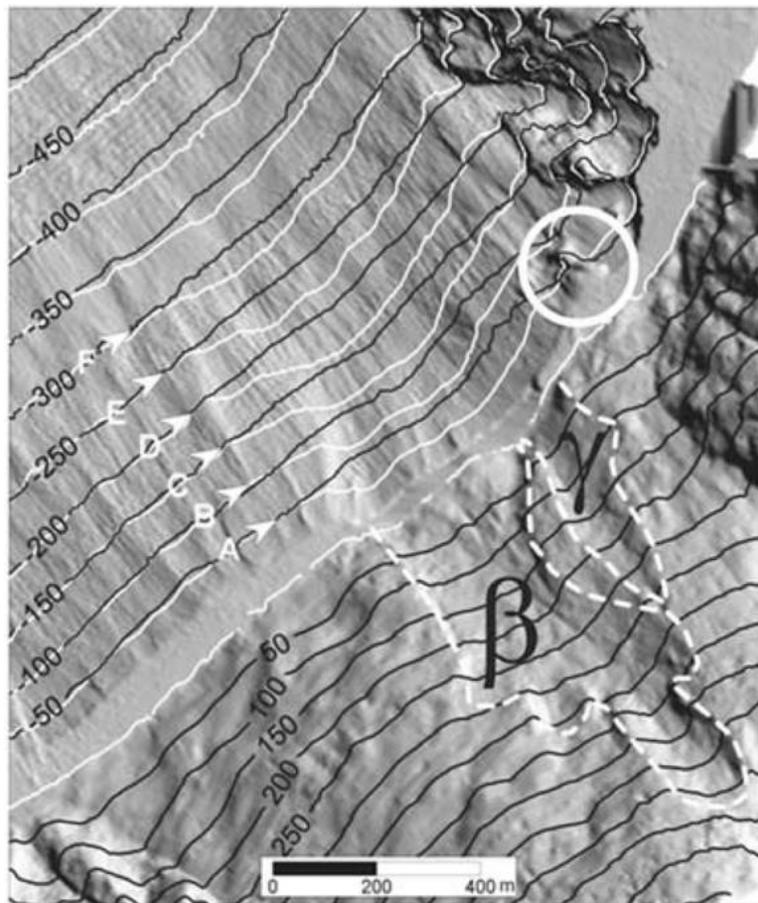


Figura 5. Comparazione fra le batimetrie pre- e post-evento 2002 (rispettivamente nere e bianche) nella porzione sommersa della Sciara del Fuoco a Stromboli. Da Chiocci et al., 2008.

### *Evento di dimensioni piccole*

Anche eventi di piccole dimensioni, che spesso non generano nemmeno onde di maremoto, possono essere pericolosi per infrastrutture sui fondali e sulle coste. Ad esempio, frane generate da un terremoto in Algeria nel 2003 (Fig. 6) ruppero contemporaneamente 6 cavi di telecomunicazioni (Cattaneo et al., 2012), mentre a Creta un terremoto nel 2020 danneggiò il cavo MedNautilus; vale la pena ricordare come ad oggi oltre il 90% delle telecomunicazioni e del traffico dati passino nei cavi sottomarini.

Anche lavori di ingegneria costiera possono generare instabilità sottomarina: la costruzione del principale porto container italiano su una piana costiera adiacente al canyon sottomarino di Gioia ha creato una situazione di rischio peculiare. Nel 1977, durante i lavori di dragaggio, una frana di circa 5 milioni di  $m^3$  generò onde di 5 m che distrussero 1 km della costruenda diga portuale.

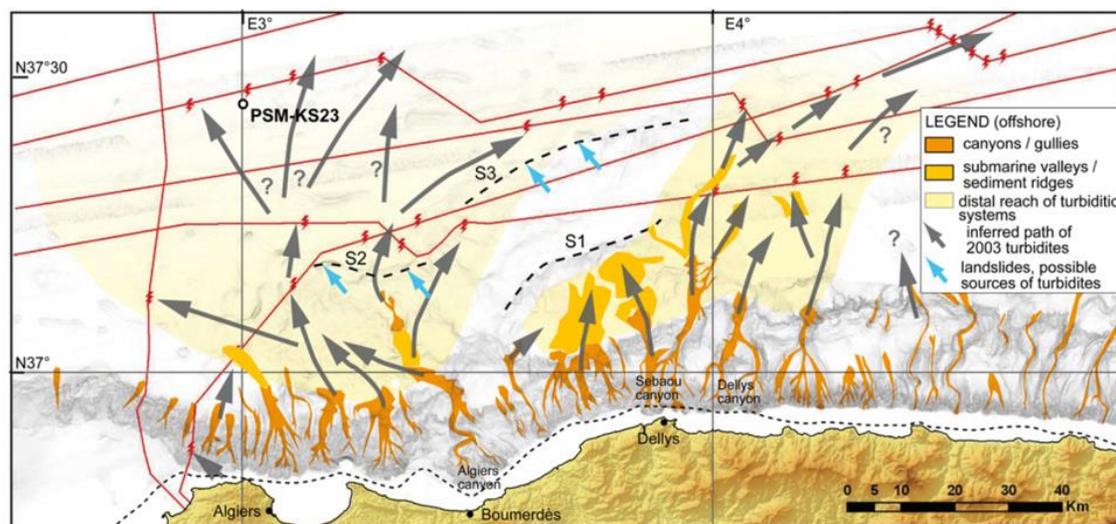


Figura 6. Flussi gravitativi e rottura di cavi sottomarini (simboli rossi) prodotti dal terremoto di Boumerdès nel 2003 (da Cattaneo et al., 2012).

### Gestione del rischio: criticità e prospettive

Nonostante l'evidente pericolosità di molti contesti costieri mediterranei, si osserva una sistematica sottovalutazione del rischio geologico marino, riconducibile all'effetto *out of sight, out of mind* (l'invisibilità dei processi riduce la percezione del rischio). Nella mitigazione del rischio da parte delle autorità pubbliche, un ruolo importante è anche quello della frammentazione istituzionale, con competenze sulla sicurezza dell'ambiente marino-costiero disperse tra enti diversi (capitanerie di porto, protezione civile, ministeri dell'industria, dell'ambiente, dell'agricoltura, della difesa, dell'interno, in ultimo e finalmente, il ministero delle politiche del mare di recente istituzione).

Per mitigare i georischi marini, oltre all'aspetto della razionalizzazione istituzionale nella gestione del territorio sommerso, il mondo della ricerca può contribuire con una mappatura sistematica delle aree critiche con procedure standardizzate, con la creazione di nuova sensoristica sottomarina per l'allerta precoce, le simulazioni numeriche delle dinamiche oceanografiche e geologiche, per modellare eventi estremi (mareggiate, terremoti, alluvioni).

### Conclusioni

Lo studio dei georischi marini nel Mediterraneo rappresenta una sfida scientifica e gestionale di crescente importanza. I casi analizzati dimostrano come eventi di grandi dimensioni siano catastrofici ma anche eventi a media e piccola scala possano generare impatti molto importanti su infrastrutture e comunità costiere.

Le moderne tecnologie di esplorazione offrono strumenti potenti per la caratterizzazione del rischio, ma il loro potenziale rimane largamente inesperto senza un deciso salto di qualità nella governance del territorio marino-costiero.

Investire nella prevenzione non è più un'opzione, ma una necessità per lo sviluppo sostenibile dell'economia blu nel Mediterraneo così come in altre parti del mondo.

### Bibliografia

Cattaneo, A., Babonneau, N., Ratzov, G., Dan-Unterseh, G., Yelles, K., Bracène, R., ... , Déverchère, J., 2012. Searching for the seafloor signature of the 21 May 2003 Boumerdès earthquake offshore central Algeria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(7), 2159-2172.

- Chiocci F. L., De Alteriis G., 2006. The Ischia debris avalanche: first clear submarine evidence in the Mediterranean of a volcanic island prehistorical collapse. *Terra Nova*, 18(3), 202-209.
- Chiocci F. L., Romagnoli C., Tommasi P., Bosman A., 2008. The Stromboli 2002 tsunamigenic submarine slide: characteristics and possible failure mechanisms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B10).
- Cronin S. J., Borrero J., Latuila F., Kula T., Heni N., Tuakafu P., Ward S.N., 2023, December. Deposits and Impacts of the 15 January 2022 Hunga Volcanic-Eruption Triggered Tsunami in the Tongan Archipelago. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2023, pp. NH51B-03).
- De Alteriis G., Insinga D. D., Morabito S., Morra V., Chiocci F. L., Terrasi F., ... , Pazzanese M., 2010. Age of submarine debris avalanches and tephrostratigraphy offshore Ischia Island, Tyrrhenian Sea, Italy. *Marine Geology*, 278(1-4), 1-18.
- Diesing M., Green S. L., Stephens D., Lark R. M., Stewart H. A., Dove D., 2014. Mapping seabed sediments: Comparison of manual, geostatistical, object-based image analysis and machine learning approaches. *Continental Shelf Research*, 84, 107-119.
- European Commission, 2022. Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, Joint Research Centre, Addamo, A., Calvo Santos, A., Guillén, J., et al., The EU blue economy report 2022, *Publications Office of the European Union*, <https://data.europa.eu/doi/10.2771/793264>
- Lurton X., Augustin J. M., 2010. A measurement quality factor for swath bathymetry sounders. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 35(4), 852-862.
- Mackenzie K.V., 1981. Discussion of sea water sound-speed determinations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3), 801-806.
- Marani M.P., Gamberi F., Rosi M., Bertagnini A., Di Roberto A., 2009. Subaqueous density flow processes and deposits of an island volcano landslide (Stromboli Island, Italy). *Sedimentology*, 56(5), 1488-1504.
- Mayer L., 2023. Uncrewed surface systems facilitating a new era of global ocean exploration. *The International Hydrographic Review*, 29(1), 42-55.
- Serpelloni E., Vannucci G., Pondrelli S., Argnani A., Casula G., Anzidei M., ... , Gasperini P., 2007. Kinematics of the Western Africa-Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophysical Journal International*, 169(3), 1180-1200.
- Tinti S., Chiocci F. L., Zaniboni F., Pagnoni G., De Alteriis, G., 2011. Numerical simulation of the tsunamis generated by a past catastrophic landslide on the volcanic island of Ischia, Italy. *Marine Geophysical Research*, 32, 287-297.
- United Nations Environment Programme/Mediterranean Action Plan and Plan Bleu. 2020. State of the Environment and Development in the Mediterranean. Nairobi.

**Manoscritto ricevuto il 04/04/2025; accettato il 15/04/2025**