

MODELLI DI PERICOLOSITÀ E RISCHIO NELLE ATTIVITÀ DI PROTEZIONE CIVILE: UTILIZZO E PROSPETTIVE IN ITALIA

DOSSIER

Daniela Di Bucci,

Dipartimento della Protezione Civile, Italia

daniela.dibucci@protezionecivile.it

Abstract. Il sistema italiano di protezione civile rappresenta un contesto multilivello integrato, volto a proteggere le persone, i beni e l'ambiente dai pericoli naturali e antropici. I modelli di pericolosità e rischio sono essenziali in tutte le fasi di gestione del rischio. Indirizzano le politiche di preparazione e prevenzione, come i piani di protezione civile, o i programmi di rafforzamento strutturale del costruito. Supportano inoltre la gestione delle emergenze attraverso sistemi di allerta precoce, monitoraggio in tempo reale, modelli probabilistici e valutazioni rapide del danno, che sono alla base del processo decisionale di protezione civile. Nelle fasi di recupero post-evento, contribuiscono a definire priorità nella ricostruzione e strategie di "build back better". Approcci multi-rischio stanno assumendo a un ruolo sempre più importante. La percezione e la comunicazione del rischio, così come le sfide emergenti poste dal cambiamento climatico, meritano particolare attenzione. Le priorità future includono una valutazione multi-rischio avanzata, l'integrazione della vulnerabilità sociale e l'uso dell'intelligenza artificiale nella modellazione di pericolosità e rischio, per migliorare le decisioni basate sull'evidenza nella gestione del rischio di disastri.

Parole chiave: Modelli di pericolosità e rischio; Valutazione multi-rischio; Gestione del rischio di disastri; Protezione civile.

Introduzione

Il sistema italiano di protezione civile (Servizio Nazionale della

Protezione Civile) rappresenta un contesto integrato ideato per salvaguardare la popolazione, i territori e l'ambiente costruito dai pericoli naturali e antropici (Decreto Legislativo 1, 2018).

In questo lavoro si intende esaminare come i modelli di pericolosità e rischio vengano impiegati durante tutto il ciclo di gestione del rischio di disastri (*disaster risk management*, DRM), enfatizzando l'integrazione della conoscenza scientifica in un processo decisionale di protezione civile basato sull'evidenza. Viene qui adottata una prospettiva nazionale, pur riconoscendo la natura intrinsecamente multi-scala della valutazione e gestione del rischio.

HAZARD AND RISK MODELS IN CIVIL PROTECTION ACTIVITIES: USE AND PERSPECTIVES IN ITALY

Abstract. The Italian civil protection system is a comprehensive multi-level framework aimed at protecting people, property and the environment from natural and anthropogenic hazards. Hazard and risk models are essential for all phases of risk management. They guide preparedness and prevention policies, such as plans and structural retrofit programmes. They also underpin emergency management through early warning systems, real time monitoring, rapid damage assessments, and probabilistic models that support civil protection decision-making. In recovery phases, they inform reconstruction priorities and enable "build back better" strategies. An increasingly important role is played by multi-risk approaches. Risk perception and communication, as well as the emerging challenges posed by climate change, deserve special attention. Future priorities also include improved multi-risk assessment, integration of social vulnerability, and the

Il sistema italiano di protezione civile si occupa di tutte le fasi del DRM: previsione e prevenzione (attraverso misure non strutturali), preparazione, emergenza e recupero post-evento. Ogni fase richiede specifici input scientifici, che vanno dalle valutazioni probabilistiche della pericolosità ai sistemi di monitoraggio e previsione in tempo reale.

Il coinvolgimento della comunità scientifica è centrale: essa fornisce competenze in geoscienze, ingegneria, meteorologia, scienze sociali. Questo approccio collaborativo assicura che i modelli riflettano le conoscenze scientifiche più recenti e possano essere aggiornati man mano che nuovi dati e metodologie diventano disponibili (Dolce e Di Bucci, 2015). L'integrazione nella modellazione di una prospettiva multi-pericolo e multi-rischio è una priorità in evoluzione, a cui il cambiamento climatico aggiunge ulteriori complessità, alterando frequenze e intensità dei pericoli mentre modifica i modelli di esposizione e vulnerabilità, spingendo così verso modelli di rischio adattivi, capaci di incorporare tendenze emergenti e incertezze.

Rischi di protezione civile in Italia

L'Italia affronta molti pericoli naturali e antropogenici, che ne definiscono le priorità di protezione civile (Decreto Legislativo 1, 2018). Ad esempio, la pericolosità sismica è particolarmente impattante, come testimoniato dai terremoti storici, che hanno causato ingenti perdite di vite umane e danni (Guidoboni *et al.*, 2018). I modelli di pericolosità sismica quantificano le probabilità di occorrenza del moto del suolo per diversi periodi di ritorno e informano i modelli di rischio sismico, le norme tecniche per le costruzioni e la pianificazione.

use of artificial intelligence in hazard and risk modelling to enhance evidence-based decisions in disaster risk management.

Keywords: Hazard and Risk models; Multi-Risk Assessment; Disaster Risk Management; Civil Protection.

Introduction

The Italian civil protection system is a comprehensive framework designed to safeguard populations, territories and the built environment from natural and anthropogenic hazards (Legislative Decree 1, 2018).

This work aims at examining how hazard and risk models are employed throughout the disaster risk management (DRM) cycle, emphasising the integration of scientific knowledge into evidence-based decision making for civil protection. A national perspective is adopted, while recognising

the inherently multi-scale nature of risk assessment and management.

The Italian civil protection system deals with all phases of DRM, including forecast and prevention, preparedness through non-structural measures, emergency, and post-event recovery. Each phase requires specific scientific inputs, ranging from probabilistic hazard assessments to real-time monitoring and forecasting systems.

Scientific community engagement is central, providing expertise in geosciences, engineering, meteorology, and social sciences. This collaborative approach ensures that models reflect current scientific understanding, and can be updated as new data and methodologies become available (Dolce and Di Bucci, 2015). The integration of a multi-hazard risk perspective is an evolving priority. Climate change adds further complexity, altering haz-

La pericolosità vulcanica è un altro dei motivi principali di preoccupazione, con più sistemi vulcanici attivi che richiedono un monitoraggio continuo: l'area vulcanica napoletana (Vesuvio, Campi Flegrei, Ischia), il Monte Etna, le Isole Eolie. Ogni sistema presenta caratteristiche distintive e specifici impatti potenziali. I modelli di pericolosità integrano eruzioni esplosive, flussi piroclastici e di lava, cadute di tefra, lahar, rilascio gas vulcanici. Nelle isole vulcaniche, le eruzioni possono generare frane lungo i versanti del vulcano verso mare, che a loro volta possono indurre onde di tsunami (Dolce *et al.*, 2020).

I pericoli idrogeologici includono inondazioni, frane e colate detritiche che interessano ampie porzioni del territorio italiano (Trigila *et al.*, 2025). L'eterogeneità geologica, la morfologia spesso caratterizzata da pendenze elevate, gli eventi di precipitazione intensa e le modifiche antropiche ai sistemi di drenaggio contribuiscono all'instabilità idrogeologica. I modelli di pericolosità combinano parametri geologici, morfologici, di copertura del suolo e idrologici per identificare le aree soggette a instabilità di versante (Reichenbach *et al.*, 2018). La valutazione della pericolosità da alluvione utilizza la modellazione idraulica per delineare le aree di inondazione per diversi periodi di ritorno, considerando la portata dei corsi d'acqua, la topografia e le infrastrutture idrauliche (Decreto Legislativo 49, 2010).

La vulnerabilità dell'ambiente costruito rispetto a questi pericoli dipende dalle caratteristiche costruttive, dalle condizioni di manutenzione e dall'esposizione di specifiche infrastrutture critiche. I modelli di vulnerabilità valutano il potenziale danno fisico agli edifici e alle infrastrutture e consentono la quantificazione del rischio combinando le componenti di pericolosità, esposizione e vulnerabilità.

ard frequencies and intensities while modifying exposure and vulnerability patterns, thus pushing towards adaptive risk models capable of incorporating emerging trends and uncertainties.

Civil protection risks in Italy

Italy faces many natural and human-induced hazards that define its civil protection priorities (Legislative Decree 1, 2018). For instance, seismic hazard is particularly impacting, as witnessed by historical earthquakes, which have caused extensive damage and loss of life (Guidoboni *et al.*, 2018). Seismic hazard models quantify ground motion probabilities of occurrence for different return periods, and inform seismic risk models, national building codes, and land-use planning. Volcanic hazard is another major concern with active volcanic systems

requiring continuous monitoring, such as the Neapolitan volcanic area (Vesuvius, Campi Flegrei, Ischia), Mount Etna, and the Aeolian Islands. Each system presents distinct characteristics and potential impacts. Hazard models integrate explosive eruptions, pyroclastic and lava flows, tephra fall, lahars, and volcanic gases. In volcanic islands, eruptions can generate landslides along volcano slopes, which in turn can induce tsunami waves (Dolce *et al.*, 2020).

Hydrogeological hazards encompass floods, landslides and debris flows, affecting extensive portions of Italian territory (Trigila *et al.*, 2025). Geological heterogeneity, steep topography, intense precipitation events, and anthropogenic modifications to drainage systems contribute to hydrogeological instability. Hazard models combine geological, morphological, land cover,

L'approccio multi-rischio tiene conto del fatto che i pericoli quasi mai si verificano singolarmente (si veda Zschau, 2017, per una revisione). I territori possono dover fronteggiare più pericoli tra loro indipendenti, oppure effetti a cascata in cui un evento ne scatena di successivi. Anche la vulnerabilità e l'esposizione, negli scenari multi-pericolo, mostrano un'evoluzione dinamica. I modelli multi-rischio tentano di caratterizzare queste interazioni, sebbene sfide metodologiche rimangano aperte nella quantificazione delle probabilità composite e degli impatti cumulati.

La centralità dell'ambiente costruito nella valutazione del rischio riflette il suo duplice ruolo, sia come principale bene a rischio, sia come determinante dell'esposizione e della vulnerabilità della popolazione. Le aree urbane concentrano popolazione e attività economiche, creando condizioni in cui gli eventi pericolosi possono produrre conseguenze catastrofiche. Inoltre, i centri storici sono importanti, specialmente in Italia, anche per il loro valore come siti del patrimonio culturale.

Esempi di uso dei modelli di rischio nella prevenzione e preparazione

I modelli di rischio supportano le attività di prevenzione e preparazione attraverso la valutazione sistematica di pericolosità, esposizione e vulnerabilità.

Il *National Risk Assessment* italiano (https://www.protezionecivile.gov.it/static/5cffe32c9803b0bddce533947555cf1/Documento_sulla_Valutazione_nazionale_dei_rischi.pdf), ad esempio, fornisce una valutazione complessiva dei rischi di disastro incorporando molteplici pericolosità e considerando i loro potenziali impatti sulla popolazione, l'economia, l'ambiente, i

and hydrological parameters to identify areas prone to slope failures (Reichenbach *et al.*, 2018). Flood hazard assessment utilises hydraulic modelling to delineate inundation areas for different return periods, considering river discharge, topography, and hydraulic infrastructure (Legislative Decree 49, 2010).

The built environment's vulnerability to these hazards depends on construction characteristics, maintenance conditions, and exposure of critical infrastructure. Vulnerability models assess potential physical damage to buildings and infrastructure, and enable risk quantification by combining hazard, exposure, and vulnerability components.

Multi-risk assessment recognises that hazards do not occur as isolated events (see Zschau, 2017, for a review). Territories may face multiple

independent hazards or cascading effects where one event triggers additional phenomena. Vulnerability and exposure as well show a dynamic evolution in multi-hazard scenarios. Multi-risk models attempt to characterise these interactions, though methodological challenges remain in quantifying coupled probabilities and compound impacts.

The built environment's centrality in risk assessment reflects its dual role as both the primary asset at risk, and a determinant of population exposure and vulnerability. Urban areas concentrate population and economic activities, creating conditions where hazard events can produce catastrophic consequences. Furthermore, historic centres are important, especially in Italy, for their value as cultural heritage sites.

beni culturali. A seconda del rischio considerato, questo può informare la pianificazione nazionale di protezione civile, le decisioni sull'allocazione delle risorse, o la definizione delle priorità nelle strategie di prevenzione.

Le iniziative di prevenzione strutturale mirano a ridurre la vulnerabilità attraverso interventi su edifici, infrastrutture e sistemi territoriali. Il Piano Nazionale di Prevenzione Sismica (Dolce *et al.*, 2021), ad esempio, coordina gli sforzi per migliorare la sicurezza sismica in più settori indirizzando e (co) finanziando i programmi di intervento. I modelli economici supportano le analisi costi-benefici, che sottendono all'allocazione dei finanziamenti e alla programmazione e realizzazione degli interventi.

Per quanto riguarda il rischio sismico e le norme tecniche per le costruzioni, in Italia la regolamentazione si è evoluta da approcci prescrittivi verso un quadro di progettazione di tipo prestazionale, che considera esplicitamente le intensità del moto del suolo attese e le caratteristiche di risposta strutturale (NTC, 2018).

La pianificazione di protezione civile a livello nazionale, regionale e locale si basa su scenari di rischio per definire procedure operative, risorse necessarie e meccanismi di coordinamento (<https://servizio-nazionale.protezionecivile.gov.it/en/approfondimento/civil-protection-planning/>). Lo sviluppo di scenari utilizza modelli di pericolosità per definire le potenziali caratteristiche degli eventi, combinati con database di esposizione e funzioni di vulnerabilità per stimare gli impatti. Gli scenari di pianificazione considerano diverse intensità e localizzazioni dei pericoli, consentendo la preparazione per varie condizioni di emergenza.

Examples of use of risk models in prevention and preparedness

Risk models support prevention and preparedness activities through systematic assessment of hazards, exposure, and vulnerability. The Italian National Risk Assessment (https://www.protezionecivile.gov.it/static/5cffe32c9803b0bddce533947555cf1/Documento_sulla_Valutazione_nazionale_dei_rischi.pdf), for instance, provides a comprehensive evaluation of risks, incorporating multiple hazards and considering their potential impacts on population, economy, environment, and cultural heritage. Depending on the considered risk, it may inform national civil protection planning, resource allocation decisions, and prevention strategy prioritisation. Structural prevention initiatives aim to reduce vulnerability through interventions on buildings, infrastructure,

and territorial systems. The National Seismic Prevention Plan (Dolce *et al.*, 2021), for example, coordinates efforts to improve seismic safety across multiple sectors, and to guide intervention programmes. Economic models support cost-benefit analyses, which inform funding allocation and implementation scheduling.

As for seismic risk and building codes, in Italy the regulation has evolved from prescriptive approaches toward a performance-based design framework that explicitly considers expected ground motion intensities and structural response characteristics (NTC, 2018).

Civil protection planning at national, regional, and local levels relies on risk scenarios to define operational procedures, resource requirements, and coordination mechanisms (<https://servizio-nazionale.protezionecivile.gov.it/en/approfondimento/civil-protection-planning/>).

Sia i piani nazionali di protezione civile sia i programmi nazionali di soccorso regolamentano procedure, capacità, attrezzature e personale per rispondere alle emergenze più severe. Entrambi si basano su scenari e modelli di pericolosità e rischio. Per il rischio vulcanico, sono definiti nei piani anche i livelli di allerta, le procedure di evacuazione e le strutture di risposta alle emergenze. Questi piani incorporano modelli di pericolosità vulcanica che collegano i parametri di monitoraggio alle probabilità di eruzione e ai fenomeni attesi, fornendo basi scientifiche per i protocolli decisionali (Dolce *et al.*, 2020).

Esempi di uso dei modelli di rischio nella gestione delle emergenze e nel recupero post-evento

Durante un'emergenza, i modelli di pericolosità e rischio supportano il processo decisionale nella fase operativa attraverso previsioni dei fenomeni e valutazioni degli impatti in tempo reale. La gestione del rischio idrogeologico è un esempio di questa integrazione, con reti di monitoraggio nazionali e regionali che forniscono dati continui su precipitazioni, livelli dei fiumi e umidità del suolo (<https://mappe.protezionecivile.gov.it/en/risks-maps-and-dashboards/radar-map/>). I modelli meteorologici prevedono la distribuzione delle precipitazioni, mentre i modelli idrologici traducono queste previsioni in probabilità di occorrenza di inondazioni e frane. Sulla base di queste previsioni, le autorità di protezione civile emettono poi le allerte, attivando conseguenti misure di preparazione e comportamenti di autoprotezione (<https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/meteo-hydro/alert/>).

Nelle prime ore successive a terremoti severi, le stime preliminari dei danni guidano le operazioni di soccorso, la predispo-

scientific foundations for decision-making protocols (Dolce *et al.*, 2020).

Examples of use of risk models in emergency management and recovery

During an emergency, hazard and risk models support operational decision-making through real-time forecasting and impact assessment. Hydrogeological risk management exemplifies this integration, with national and regional monitoring networks providing continuous data on precipitation, river levels, and soil moisture (<https://mappe.protezionecivile.gov.it/en/risks-maps-and-dashboards/radar-map/>). Meteorological models forecast precipitation patterns, while hydrological models translate these forecasts into flood and landslide probability of occurrence. Civil protection authorities issue alerts based on these fore-

sizione dei ricoveri temporanei e la mobilitazione delle risorse. Le mappe di scuotimento, generate in base ai dati acquisiti dalle reti di monitoraggio sismico, rappresentano la distribuzione del moto del suolo (<https://shakemap.ingv.it/>). Queste mappe, combinate con database di esposizione degli edifici e funzioni di fragilità, consentono modellazioni speditive delle perdite attese (<https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/seismic/activities/emergency-planning-and-damage-scenarios/>), che vengono poi aggiornate man mano che i rilievi sul campo forniscono osservazioni dirette dei danni.

La gestione delle crisi vulcaniche integra il monitoraggio in continuo con modelli a supporto delle decisioni che mettono in relazione fenomeni osservabili e probabilità di eruzione. I sistemi di monitoraggio multi-parametrici registrano la sismicità, la deformazione del suolo, le emissioni di gas e le variazioni di falda e geochimiche (<https://www.ov.ingv.it/index.php>). Modelli ad albero degli eventi interpretano questi segnali all'interno di schemi concettuali relativi alla dinamica dei sistemi vulcanici, aggiornando le stime di probabilità di eruzione man mano che i dati provenienti dal monitoraggio evolvono. I sistemi di livelli di allerta traducono soglie di probabilità in stati operativi, ciascuno associato a specifiche azioni di protezione civile.

In tutti questi esempi, una sfida importante sta nel gestire le incertezze preservando la fiducia del pubblico e assicurando che venga dato séguito ai messaggi ufficiali, una volta emessi (Bebbington *et al.*, 2025).

Infine, durante la fase di recupero post-evento, i modelli di rischio, vincolati da indagini dettagliate sui danni agli edifici, possono essere utilizzati per stabilire le priorità e pianificare gli interventi di ricostruzione, e per allocare le risorse (Oliveira *et*

al., 2017). Questi modelli includono valutazioni sulla sicurezza strutturale e stime dei costi di riparazione, informando le politiche riguardanti gli alloggi temporanei, il supporto economico e gli standard per la ricostruzione definitiva. La pianificazione della fase di recupero incorpora sempre più i principi del “*build back better*” (ricostruire meglio) per ridurre la vulnerabilità futura. I modelli di rischio supportano questo approccio, identificando misure di riduzione della vulnerabilità e quantificando le conseguenti riduzioni di rischio attese; consentono così decisioni consapevoli sugli investimenti destinati alle fasi di recupero e di ricostruzione.

Esempi di uso dei modelli di rischio nella comunicazione del rischio

La percezione dei rischi di disastro influenza le iniziative di prevenzione e preparazione, l'efficacia della risposta in emergenza e l'accettazione delle politiche connesse. Le valutazioni scientifiche di un rischio spesso divergono dalle percezioni pubbliche del medesimo, riflettendo differenze nel modo in cui esperti e persone comuni valutano probabilità, conseguenze e livelli di rischio accettabili (ad es., Cugliari *et al.*, 2022; Mafuko Nyandwi *et al.*, 2023). Le strategie di comunicazione tentano di colmare questo divario traducendo le valutazioni tecniche del rischio in formati accessibili (ad es., Pielke, 2007).

Le mappe di pericolosità e rischio sono anche utilizzate come strumenti di visualizzazione, fornendo modelli spaziali dell'intensità dei pericoli e dei livelli di rischio. Esse possono migliorare la percezione del rischio fornendo stime oggettive delle probabilità e degli impatti; tuttavia, tradurre informazioni probabilistiche in formati che possano essere compresi “intuitiva-

casts, triggering preparedness measures and self-protection behaviours (<https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/meteo-hydro/alert/>).

In the first hours following severe earthquakes, preliminary damage estimates guide rescue operations, temporary shelter provision, and resource mobilisation. Shake maps, generated from seismic monitoring networks, characterise ground motion distribution (<https://shakemap.ingv.it/>). These maps, combined with building exposure databases and fragility functions, enable rapid modelling of expected losses (<https://rischi.protezionecivile.gov.it/en/seismic/activities/emergency-planning-and-damage-scenarios/>), which are then updated as field surveys provide direct damage observations.

Volcanic crisis management integrates continuous monitoring with decision

support models linking observable phenomena to eruption probabilities. Multi-parametric monitoring systems track seismicity, ground deformation, gas emissions, and geochemical variations (<https://www.ov.ingv.it/index.php>). Event tree models interpret these signals within conceptual frameworks of volcanic system dynamics, updating eruption probability estimates as monitoring data evolve. Alert level systems translate probability thresholds into operational states, each associated with specific civil protection actions. In all these examples, a major challenge lies in managing uncertainties while maintaining public trust and ensuring that warnings are taken seriously when issued (Bebbington *et al.*, 2025).

Finally, during the post-emergency recovery phase, risk models, constrained by detailed building damage surveys,

can be used to prioritise and plan reconstruction interventions, and allocate resources (Oliveira *et al.*, 2017). They include structural safety evaluations and repair cost estimation. These data inform policies regarding temporary housing, economic support, and permanent reconstruction standards. Recovery planning increasingly incorporates build-back-better principles to reduce future vulnerability. Risk models support this approach by identifying vulnerability reduction measures, and by quantifying expected future risk reductions, enabling informed decisions about recovery and reconstruction investments.

Examples of use of risk models in risk communication

Risk perception influences prevention and preparedness initiatives, emergency response effectiveness, and

policy acceptance. Scientific risk assessments often diverge from public risk perceptions, reflecting differences in how experts and laypeople evaluate probabilities, consequences, and acceptable risk levels (e.g., Cugliari *et al.*, 2022; Mafuko Nyandwi *et al.*, 2023). Communication strategies attempt to bridge this gap by translating technical risk assessments into accessible formats (e.g., Pielke, 2007).

Hazard and risk maps serve as visualisation tools, conveying spatial patterns of hazard intensities and risk levels. They can inform perception by providing objective probability and consequence estimates. However, translating probabilistic information into formats that can be intuitively understood remains challenging. Comparative risk frameworks help contextualise risks from natural and human-induced hazards against more familiar risks,

mente” rimane una sfida aperta. Schemi di confronto fra rischi aiutano a contestualizzare i rischi causati da pericoli naturali e antropici rispetto a rischi più familiari per il pubblico, anche se occorre prestare attenzione per evitare confronti inappropriati (ad es., Savadori *et al.*, 2022).

Le campagne di comunicazione del rischio impiegano vari approcci: coinvolgimento delle comunità, programmi educativi nelle scuole, materiali informativi pubblici ed esercizi di mappatura partecipata del rischio (ad es., campagna “Io non rischio”; <https://www.iononrischio.gov.it/en/>). La ricerca nelle scienze sociali contribuisce con approfondimenti sui fattori che influenzano la percezione del rischio e i comportamenti, sia della popolazione, sia dei decisori. La costruzione della fiducia tra autorità e popolazione rimane una priorità (Di Bucci e Savadori, 2018).

Discussione

Il cambiamento climatico sta introducendo sfide fondamentali alle modellazioni di pericolosità e rischio, alterando le proprietà statistiche dei fenomeni naturali e influenzando indirettamente la vulnerabilità e l'esposizione (Stalhandske *et al.*, 2024). Gli approcci tradizionali assumono spesso la stazionarietà di fenomeni e processi, ma il cambiamento climatico viola questa assunzione, richiedendo che i modelli incorporino tendenze e processi non stazionari.

I pericoli idrogeologici appaiono particolarmente sensibili al cambiamento climatico, con aumenti previsti della siccità o nelle intensità e frequenze delle precipitazioni estreme; i modelli aggiornati devono tenere conto di queste tendenze. L'innalzamento del livello del mare esacerba i pericoli di inondazione

ed erosione costiera, rendendo necessaria una revisione delle stime del rischio conseguente. Gli aumenti di temperatura influenzano il pericolo di incendi boschivi, ad esempio attraverso l'aumento di *stress* per la vegetazione e l'alterazione dei tassi di umidità del combustibile.

I modelli di vulnerabilità ed esposizione evolvono attraverso cambiamenti socioeconomici, processi di urbanizzazione e misure di adattamento; questa dinamica ha conseguenze anche per quei rischi che non sono direttamente correlati al cambiamento climatico. La concentrazione della popolazione nelle aree urbane aumenta l'esposizione, mentre l'invecchiamento del patrimonio edilizio e una sua manutenzione differita nel tempo possono aumentare la vulnerabilità fisica. Al contrario, i miglioramenti delle norme tecniche per le costruzioni e i programmi di adeguamento, miglioramento e rafforzamento riducono la vulnerabilità per le strutture più recenti o su cui si sia intervenuti.

Lo sviluppo economico aumenta il valore esposto dei beni a rischio anche quando la vulnerabilità fisica diminuisce. I cambiamenti demografici (invecchiamento della popolazione, modelli migratori) influenzano le dimensioni della vulnerabilità sociale. La valutazione dinamica del rischio tenta di catturare anche questi cambiamenti nel tempo, effettuando delle proiezioni su come il rischio evolva in diversi scenari di cambiamento della pericolosità, di crescita dell'esposizione e di modifica della vulnerabilità, supportando ove possibile la pianificazione di lungo termine e le valutazioni delle strategie di adattamento.

Gli approcci multi-rischio riconoscono le interazioni tra i pericoli (Zschau J., 2017) e gli impatti cumulativi sui sistemi esposti. Le metodologie per la valutazione multi-rischio, tuttavia,

though care must be taken to avoid inappropriate comparisons (e.g., Savadori *et al.*, 2022).

Risk communication campaigns employ various approaches, including community engagement, educational programmes in schools, public information materials, and participatory risk mapping exercises (e.g., I don't take risks, <https://www.iononrischio.gov.it/en/>). Social science research contributes insights into factors influencing risk perception and behaviours, both of population and decision-makers. Trust-building between authorities and populations remains a priority (Di Bucci and Savadori, 2018).

Discussion

Climate change is introducing fundamental challenges to hazard and risk modelling by altering the statistical properties of natural phenomena,

and by indirectly affecting vulnerability and exposure (Stalhandske *et al.*, 2024). Traditional approaches assume stationarity, but climate change violates this assumption, requiring models to incorporate trends and non-stationary processes.

Hydrogeological hazards appear particularly sensitive to climate change, with projected increases in extreme precipitation intensities and frequencies. Updated models must account for these trends. Sea level rise exacerbates coastal flooding and erosion hazards, necessitating revised coastal risk assessments. Temperature increases influence wildfire hazards through vegetation stress and altered fuel moisture regimes.

Vulnerability and exposure patterns evolve through socioeconomic changes, urbanisation processes, and adaptation measures. These dynam-

ics have consequences also for risks that are not directly related to climate change. Population concentration in urban areas increases exposure, while ageing building stock and deferred maintenance can increase vulnerability. Conversely, building code improvements and retrofit programmes reduce vulnerability for newer or upgraded structures.

Economic development increases asset values at risk, even when physical vulnerability decreases. Demographic changes (population ageing, migration patterns) affect social vulnerability dimensions. Dynamic risk assessment attempts to capture these temporal changes, projecting how risk evolves under different scenarios of hazard change, exposure growth, and vulnerability modification, possibly supporting long-term planning and adaptation strategy evaluations.

Multi-risk approaches recognise interactions between hazards (Zschau, 2017) and cumulative impacts on exposed systems. However, methodological frameworks for multi-risk assessment remain under development, facing challenges in characterising hazard dependencies, modelling cascading effects, and aggregating risks across different hazard types. Some approaches employ risk matrices to compare hazards qualitatively, while quantitative methods attempt to calculate compound probabilities and cumulative losses.

Spatial multi-risk assessment identifies areas exposed to multiple hazards, supporting prioritisation of prevention measures that address multiple disaster events simultaneously. Temporal aspects of multi-risk consider how antecedent events modify vulnerability to subsequent hazards, e.g.,

rimangono ancora in fase di sviluppo, affrontando sfide nella caratterizzazione delle dipendenze tra i pericoli, nella modellazione degli effetti a cascata e nell'aggregazione dei rischi a partire da diversi tipi di pericolo. Alcuni approcci impiegano matrici di rischio per confrontare qualitativamente i pericoli, mentre i metodi quantitativi tentano di calcolare probabilità composite e perdite cumulative.

La valutazione spaziale multi-rischio identifica aree esposte a molteplici pericoli, supportando la definizione delle priorità rispetto a misure di prevenzione che affrontino simultaneamente più eventi disastrosi. Gli aspetti temporali del multi-rischio considerano come gli eventi antecedenti modifichino la vulnerabilità rispetto a successivi fenomeni pericolosi: ad esempio, il danno dovuto a un terremoto severo che aumenta la vulnerabilità degli edifici rispetto agli *aftershock*, o il deterioramento legato alle condizioni meteorologiche rispetto all'impatto di fenomeni seguenti.

Le prospettive europee per la protezione civile enfatizzano l'utilizzo di approcci armonizzati (*all-hazard*) alla valutazione del rischio. A scala globale, il Quadro di Sendai per la Riduzione del Rischio di Disastri 2015-2030 (<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>) stabilisce obiettivi a livello da internazionale a locale per ridurre la mortalità da disastri, la numerosità della popolazione colpita, le perdite economiche e i danni alle infrastrutture critiche. In questo modo, il Quadro indirizza gli sforzi per aggiornare le metodologie di valutazione del rischio ed espandere la loro applicazione. L'intelligenza artificiale (IA) e il *machine learning*, infine, offrono opportunità del tutto nuove per migliorare i modelli di rischio. Le applicazioni includono avanzamenti nella previsio-

ne dei pericoli attraverso il riconoscimento di *pattern* nei dati di monitoraggio, la valutazione automatica dei danni da immagini satellitari, l'ottimizzazione dell'allocazione delle risorse in emergenza. Tuttavia, gli approcci che si avvalgono dell'IA richiedono un'attenta validazione e una debita considerazione dei limiti del metodo, incluse le dipendenze dalla qualità dei dati e i potenziali *bias* nei *set* di dati di addestramento.

Considerazioni finali

I modelli di pericolosità e di rischio costituiscono strumenti essenziali per il DRM e le attività di protezione civile in Italia, supportando il processo decisionale attraverso tutte le sue fasi. L'integrazione efficace della conoscenza scientifica nel contesto operativo richiede una collaborazione continua tra comunità scientifica e autorità di protezione civile. Lo sviluppo dei modelli deve bilanciare il rigore e il consenso scientifico con l'applicabilità operativa, assicurando che gli *output* rispondano praticamente alle esigenze decisionali, pur mantenendo solidità metodologica. La quantificazione e la comunicazione dell'incertezza rappresentano aspetti critici, poiché gli *stakeholder* chiedono di comprendere i livelli di affidabilità associati alle previsioni e alle valutazioni. Gli sviluppi futuri dei modelli includono una modellazione multi-rischio sempre più avanzata, una migliore integrazione degli effetti del cambiamento climatico e delle dimensioni di vulnerabilità sociale, l'esplorazione delle applicazioni dell'IA. Gli investimenti continui nelle reti di monitoraggio, nell'infrastruttura dati e nelle capacità di modellazione supporteranno questi progressi.

In definitiva, l'utilizzo dei modelli di rischio di disastro dipende dal loro contributo alla riduzione degli impatti degli eventi

when seismic damage increases building susceptibility to aftershocks or weather-related deterioration.

European perspectives on civil protection emphasise harmonised, all-hazard approaches to risk assessment. At the global scale, the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 (<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>) establishes international targets for reducing disaster mortality, affected populations, economic losses, and critical infrastructure damage. These commitments drive efforts to improve risk assessment methodologies and expand their application.

Finally, artificial Intelligence (AI) and machine learning offer emerging opportunities for enhancing risk models. Applications include improving hazard forecasting through pattern recog-

nition in monitoring data, automated damage assessment from satellite imagery, and optimisation of emergency resource allocation. However, AI approaches require careful validation and consideration of limitations, including data quality dependencies and potential biases in training datasets.

Final remarks

Hazard and risk models constitute essential tools for DRM and civil protection activities in Italy, supporting decision-making across all DRM phases. Effective integration of scientific knowledge into operational frameworks requires ongoing collaboration between research communities and civil protection authorities. Model development must balance scientific rigor and consensus with operational applicability, ensuring that outputs address practical decision needs while

maintaining methodological soundness. Uncertainty quantification and communication are critical aspects, as stakeholders require an understanding of the levels of reliability associated with forecasting and assessments. Future directions include enhanced multi-risk modelling, improved integration of climate change effects and social vulnerability dimensions, besides exploration of AI applications. Continued investment in monitoring networks, data infrastructure, and modelling capabilities will support these advances.

Ultimately, the use of risk models depends on their contribution to reducing disaster impacts and enhancing community resilience through informed decision-making and effective DRM strategies.

ACKNOWLEDGMENTS

The contents of this publication present the author's ideas, and do not necessarily correspond to the official opinion and policies of the Italian Civil Protection Department.

catastrofici e al miglioramento della resilienza della comunità, che avvengono attraverso un processo decisionale informato volto all'adozione di strategie efficaci di DRM.

RINGRAZIAMENTI

I contenuti di questa pubblicazione rappresentano le idee dell'autrice e non corrispondono necessariamente all'opinione ufficiale e alle politiche del Dipartimento della Protezione Civile italiana.

REFERENCES

- Bebbington M., Barsotti S., Marzocchi W., Tadini A., Widiwijayanti C., Wright H. (2025), "Forecasting During Volcanic Crises", *EarthArXiv*. <https://doi.org/10.31223/X5243J>.
- Cugliari L., Cerase A., Amato A. (2022), "Tsunami risk perception, a state-of-the-art review with a focus in the NEAM region", *FEART*, Vol. 10. <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2022.995536> ISSN=2296-6463.
- Di Bucci D., Savadori L. (2018), "Defining the acceptable level of risk for civil protection purposes: a behavioral perspective on the decision process", *Nat. Haz.*, Vol. 90 n. 1, pp. 293-324. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3046-5>.
- Dolce M., Di Bucci D. (2015), "Civil Protection Achievements and Critical Issues in Seismology and Earthquake Engineering Research", in: A. Ansal (Ed), *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*, Vol. 2. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16964-4_2.
- Dolce M., Miozzo A., Di Bucci D., Alessandrini L., Bastia S., Bertuccioli P., Bilotta D., Ciolli S., De Siervo G., Fabi D., Madeo L., Panunzi E., Silvestri V. (2020), *Civil Protection in Italy. Basic Training in Civil Protection*. Civil Protection Department, 229 pp. ISBN: 9791281195011. Available at: <https://www.protezionecivile.gov.it/it/pubblicazione/civil-protection-italy-basic-training-civil-protection>.
- Dolce M., Speranza E., De Martino G., Conte C., Giordano F. (2021), "The implementation of the Italian National Seismic Prevention Plan: A focus on the seismic upgrading of critical buildings", *IJDRR*, Vol. 62, p. 102391. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102391>.
- Guidoboni E., Ferrari G., Mariotti D., Comastri A., Tarabusi G., Sgattoni G., Valensise G. (2018), *CFTI5Med, Catalogo dei Forti Terremoti in Italia (461 a.C.-1997) e nell'area Mediterranea (760 a.C.-1500)*, INGV. Available at: <https://doi.org/10.6092/ingv.it-cfti5>
- Legislative Decree 49 (2010), Implementation of Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks (Floods Directive). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 23.02.2010.
- Legislative Decree 1 (2018), Civil Protection Code (Codice della Protezione Civile). Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, 2.01.2018.
- Mafuko Nyandwi B., Kervyn M., Habiyaemye F.M., Kervyn F., Michellier C. (2023), "Differences in volcanic risk perception among Goma's population before the Nyiragongo eruption of May 2021, Virunga volcanic province (DR Congo)", *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.*, Vol. 23, pp. 933-953. Available at: <https://doi.org/10.5194/nhess-23-933-2023>.
- NTC (2018), Decreto ministeriale 17.01.2018. Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». (18A00716) GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8.
- Oliveira C.S., De Almeida B., Di Bucci D., Dolce M., Havekes H., Kemp V., Simonet C., Thorvaldsdottir S., Twigg J., Williams R. (2017), "Recovery and avoiding risk creation". in: Poljanšek K., Marín Ferrer M., De Groeve T., Clark I. (Eds), *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*. Chapter 5.3. Available at: <https://doi.org/10.2788/842809>.
- Pielke R.A. Jr (2012), *The honest broker. Making sense of science in policy and politics*. Cambridge University Press. Available at: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511818110>.
- Reichenbach P., Rossi M., Malamud B., Mihir M., Guzzetti F. (2018), "A review of statistically-based landslide susceptibility models", *Earth-Science Rev.*, Vol. 180, pp. 60-91. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2018.03.001>.
- Savadori L., Ronzani P., Sillari G., Di Bucci D., Dolce M. (2022), "Communicating seismic risk information: The effect of risk comparisons on risk perception sensitivity", *FComm*, Vol. 7, p. 743172. Available at: <https://doi.org/10.3389/fcomm.2022.743172>.
- Stalhandske Z., Steinmann C.B., Meiler S., Sauer I.J., Vogt T., Bresch D.N., Kropf C.M. (2024), "Global multi-hazard risk assessment in a changing climate", *Sci. Rep.*, Vol. 14, p. 5875. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55775-2>.
- Trigila A., Lastoria B., Iadanza C., Bussetini M., Mariani S., D'Ascola F., Salmeri A., Cassese M.L., Pesarino V., Di Paola G., Romeo S., Rischia I., Dessì B., Spizzichino D., Licata V., Gallozzi P.L. (2025), *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - 2024*. ISPRA, Rapporti 415/2025. Available at: https://www.isprambiente.gov.it/files2025/pubblicazioni/rapporti/rapporto_ispra_dissesto_idrogeologico_ed2024_web.pdf.
- Zschau, J. (2017), "Where are we with multihazards, multirisks assessment capacities?", in: Poljansek, K., Marín Ferrer, M., De Groeve, T., Clark, I. (Eds), *Science for disaster risk management 2017: knowing better and losing less*, European Union, pp. 98-115. Available at: <https://doi.org/10.2788/688605>.