



# Sicurezza delle Infrastrutture



---

TORINO / **15-16 gennaio 2026** / Grattacielo Intesa Sanpaolo

---

*Il volume raccoglie i sommari estesi presentati alla Convention “Sicurezza delle Infrastrutture”, svoltasi a Torino il 15 e 16 gennaio 2026, evento finale della linea di ricerca del progetto Return, denominata “Resilienza multi-rischio delle Infrastrutture Critiche” (Spoke 6).*

*I 52 contributi sono riferiti prevalentemente alle attività di ricerca svolte nell’ambito dello Spoke 6 e rappresentano una panoramica di avanzamenti teorici, metodologici, di applicazioni pratiche e casi di studio nell’ambito delle problematiche che oggi si presentano per la gestione dei rischi riferiti ai sistemi di infrastrutture in Italia.*





# Il Progetto RETURN

Il progetto Return (acronimo di multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities undeR a changiNg climate) è un partenariato esteso finanziato nell'ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) italiano.

L'iniziativa si colloca tra i più rilevanti interventi nazionali dedicati allo sviluppo di conoscenze avanzate e soluzioni innovative per la gestione integrata dei rischi ambientali, naturali e antropici, e pone particolare attenzione agli effetti attuali e futuri del cambiamento climatico. L'obiettivo strategico del progetto è stato quello di rafforzare in modo strutturale la capacità del sistema nazionale della ricerca di comprendere, modellare e governare scenari di rischio complessi, caratterizzati dall'interazione simultanea di più pericolosità (approccio multi-hazard), dalla crescente esposizione di territori e infrastrutture e dalla vulnerabilità sociale, economica e istituzionale delle comunità. Tali conoscenze sono rafforzate attraverso ricerca, innovazione e trasferimento tecnologico.

Il partenariato che ha realizzato il progetto è composto da 26 soggetti, suddivisi tra università, enti di ricerca e aziende, includendo anche il Dipartimento Nazionale di Protezione Civile. La Fondazione Return, costituita per gestire il progetto, ha mobilitato risorse economiche e umane di rilievo: 115 milioni di euro di fondi complessivi, 350 ricercatori originariamente coinvolti e 400 nuovi assunti a tempo determinato. Successivamente, bandi a cascata hanno consentito di attivare altri 84 progetti supplementari ed i ricercatori sono diventati più di 800.

L'architettura del progetto è stata concepita per favorire l'integrazione tra ambiti disciplinari, scale

di analisi e livelli decisionali. Return è articolato in 8 aree tematiche dette "Spoke", ognuna dedicata a specifici ambiti.

I quattro Spoke Verticali (VS) hanno affrontato le principali tipologie di pericolosità:

- VS1 - Acqua, dedicato ai rischi idrologici e idraulici, alla siccità e agli eventi alluvionali;
- VS2 - Instabilità del terreno, come frane e subsidenza;
- VS3 - Terremoti e vulcani, dedicato alla pericolosità sismica e vulcanica;
- VS4 - Degrado ambientale, comprendente inquinamento, processi di alterazione degli ecosistemi, incendi boschivi ed erosione.

A questi si affiancano i tre Spoke Trasversali (TS), orientati all'analisi della vulnerabilità e del rischio in una prospettiva multidimensionale:

- TS1 - Insediamenti urbani e metropolitani, con attenzione ai sistemi urbani complessi;
- TS2 - Resilienza multi-rischio delle infrastrutture critiche, strategiche per il funzionamento del Paese;
- TS3 - Comunità resilienti, dedicato agli aspetti sociali, economici, giuridici e culturali della resilienza.

Completa il quadro lo Spoke Diagonale (DS), dedicato allo sviluppo di servizi climatici a supporto delle politiche di adattamento, con un ruolo centrale nella costruzione di scenari futuri e di supporto per l'ottenimento di diversi risultati degli altri Spoke.

L'elemento distintivo della ricerca risiede infine nell'approccio metodologico: le discipline tecnico-scientifiche (STEM) e quelle umanistico-socia-





li sono state integrate strutturalmente, in maniera tale da consentire di puntare ad obiettivi di valutazione effettivamente olistica dei rischi, come richiesto dal bando.

Le attività di ricerca sviluppate nei diversi Spoke hanno trovato convergenza e coerenza operativa attraverso due principali strumenti:

- i Proof of Concept (PoC), finalizzati alla verifica della fattibilità tecnica e scientifica di soluzioni innovative;
- i Virtual Testbed, ambienti simulati che consentono di testare tali soluzioni in scenari complessi e realistici, basati su contesti urbani, territoriali e infrastrutturali.

Tra i primi, spiccano prodotti realizzati per un efficace trasferimento di dati e di conoscenza alla comunità tecnica che si occupa dei rischi, (i cosiddetti “prodotti d’impatto”, rappresentati da software, banche dati e mappe a carattere nazionale). Tra i secondi, vanno citati ReturnLand e ReturnVille, che rappresentano scenari virtuali verosimili, costruiti come basi fisiche e territoriali che ospitano realtà urbane (costiere e interne) collocate strategicamente per analizzare scenari complessi di in-

terazione di elementi su cui valutare pericolosità, vulnerabilità ed esposizione al rischio. In questo contesto sono state condotte simulazioni multi-rischio che hanno utilizzato proiezioni climatiche a medio-lungo termine.

Il progetto non si è limitato alla ricerca, ma ha investito sulla condivisione del lavoro svolto attraverso diverse attività di formazione, fra le quali spiccano:

- le Academy post-universitarie, percorsi di alta formazione rivolti a studenti e giovani ricercatori provenienti da contesti disciplinari diversi;
- eventi “one shot”, come seminari brevi rivolti a studenti, dottorandi, ricercatori e professionisti.
- eventi di networking con le imprese mirati al confronto con il mondo aziendale.

Eventi come la Convention “Sicurezza delle Infrastrutture” rappresentano, infine, una delle opportunità attraverso le quali stakeholder privati e istituzionali, professionisti e ricercatori, possono entrare concretamente in contatto con le attività di Return, al di là di quanto comunque possibile attraverso la condivisione di documenti e la comunicazione professionale.





# INDICE

- 8 Bias-adjustment dei dati meteomarini a supporto dell'analisi di rischi costieri**  
Sara Tuozzo, Carlina Codato, Mariano Buccino, Mario Calabrese, Andrea Lira Loarca, Giovanni Besio, Paolo De Girolamo
- 9 L'influenza del cambiamento climatico sulla progettazione di opere marittime**  
Carolina Codato, Myrta Castellino, Paolo De Girolamo, Davide Pasquali, Marcello Di Risio
- 10 Mitigazione della vulnerabilità combinata sisma-tsunami delle infrastrutture**  
Maria Concetta Oddo, Liborio Cavaleri, Anthea Amato
- 11 Mappatura ad alta risoluzione della pericolosità del vento e del rischio indotto sulle infrastrutture critiche**  
Lorenzo Raffaele, Luca Bruno, Elisabetta Colucci
- 12 Allagamenti pluviali in ambiente urbano: un'analisi dinamica applicata alla città di Roma**  
Edna Jessica Wilches Kochinski, Sabrina Lanciotti, Benedetta Moccia, Elena Ridolfi, Fabio Russo, Francesco Napolitano
- 13 VAPIweb: un WebGIS per la valutazione delle piogge e delle piene di progetto in Italia**  
Pietro Bogoni, Paola Mazzoglio, Pierluigi Claps
- 14 Catalogo delle piene dei corsi d'acqua italiani**  
Pierluigi Claps, Daniele Ganora, Giulia Evangelista, Paola Mazzoglio, Pietro Bogoni, Marco Demateis Raveri, Irene Monforte
- 15 FOCA (Italian FLOOD and Catchment Atlas): l'atlante delle piene e dei descrittori dei bacini idrografici italiani**  
Pierluigi Claps, Giulia Evangelista, Daniele Ganora, Paola Mazzoglio, Irene Monforte
- 16 Evoluzione temporale delle piogge estreme in Italia: uno sguardo d'insieme basato su dati e metodi aggiornati**  
Paola Mazzoglio, Alberto Viglione, Daniele Ganora, Pierluigi Claps
- 17 Mappatura della Vulnerabilità al Rischio Alluvionale tra Tempi di Risposta Idrologica e Trend delle Piogge Estreme**  
Gianluca Lelli, Paola Mazzoglio, Alessio Domeneghetti, Serena Ceola
- 18 Potenziare la resilienza climatica delle infrastrutture strategiche: un approccio innovativo per la stima delle precipitazioni estreme e la modellazione degli impatti idraulici**  
Pietro Devò, Marco Marani, Vincenzo Rotella, Chiara Cesali, Giovanni Cozzuto
- 19 Dai cambiamenti climatici ai cambiamenti delle piene: approccio statistico e di modellazione afflussi-deflussi**  
Alberto Viglione, Luca Lombardo, Luigi Cafiero, Anna Basso, Paola Mazzoglio, Daniele Ganora, Pierluigi Claps, Francesco Laio
- 20 La morfologia dei bacini influenza gli effetti del global warming sulle portate di piena nelle Alpi italiane**  
Giulia Evangelista, Irene Monforte, Pierluigi Claps
- 21 TILDE (The Italian Large Dams datasEt): una nuova banca dati sulle grandi dighe italiane e sui bacini idrografici sottesi**  
Giulia Evangelista, Paola Mazzoglio, Daniele Ganora, Francesca Pianigiani, Pierluigi Claps
- 22 Elementi chiave per un approccio omogeneo alla valutazione della pericolosità idrologica delle grandi dighe italiane**  
Giulia Evangelista, Daniele Ganora, Paola Mazzoglio, Francesca Pianigiani, Pierluigi Claps
- 23 Strumenti innovativi per la resilienza delle infrastrutture idriche: il caso studio della diga di Camastra**  
Monica Corti, Matteo Antelmi, Camilla Crippa, Monica Papini, Laura Longoni
- 24 Mitigare la scarsità idrica futura: strategie ottimizzate per la gestione degli invasi in un clima che cambia**  
Mattia Neri, Elena Toth
- 25 Alluvioni e incendi boschivi: analisi probabilistica del rischio di isolamento di piccoli centri abitati**  
Tatiana Ghizzoni, Bruno Colavitto, Eva Trasforini
- 26 Progetto FIRESTARTER: Visual AI per la resilienza al rischio incendi**  
Paola Allamano, Alberto Bert, Paolo Cavagnero
- 27 Analisi costi-benefici di sistemi di protezione passiva per ponti in condizioni di incendio**  
Donatella de Silva, Andrea Miano, Gabriella De Rosa, Andrea Prota, Emidio Nigro





- 28 Sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni per gli incendi boschivi: applicazione al caso di studio della Calabria**  
Davide Berardi, Marta Galuppi, Alessio De Angelis, Angelo Libertà, Mara Lombardi
- 29 Valutazione del trasporto solido nel torrente Maddalena mediante il modello SMART-SED**  
Monica Corti, Matteo Antelmi, Camilla Crippa, Monica Papini, Laura Longoni
- 30 Pericolosità idraulica multi-scenario in piccoli bacini ripidi e impatti su infrastrutture critiche da processi frana-piena concatenati**  
Margherita Lombardo, Pierfranco Costabile, Carmelina Costanzo, Lisa Borgatti, Giacomo Titti, Giulia Evangelista, Pierluigi Claps
- 31 Stima della suscettibilità e intensità da frana in Calabria**  
Giacomo Titti, Matteo Antelmi, Laura Longoni, Lisa Borgatti
- 32 Zonazione nazionale dell'esposizione della rete stradale a fenomeni geo-idrologici rapidi**  
Massimiliano Alvioli, Federica Fiorucci, Giuseppe Esposito, Ivan Marchesini
- 33 Frane superficiali e colate detritiche: analisi, modellazione e impatti sulle infrastrutture**  
Francesco Castelli, Campisi Tiziana, Gabriele Freni, Valentina Lentini
- 34 Gestione del rischio da caduta massi: il contributo della linea guida UX131 alle infrastrutture stradali italiane**  
Maddalena Marchelli, Valerio De Biagi, Bernardino Chiaia, Daniele Peila
- 35 Caratterizzazione sperimentale e modellistica delle perdite in condotte in pressione: analisi delle relazioni pressione-portata per diverse tipologie di rottura**  
Stefania Piazza, Gabriele Freni
- 36 Modellazione predittiva delle perdite d'acqua reali nelle reti di distribuzione idrica utilizzando l'algoritmo Random Forest**  
Stefania Piazza, Gabriele Freni
- 37 MIADIGITACQUE - Modellizzazione Idraulica Avanzata e servizi idrici DIGITali per la gestione predittiva degli ACQUEdotti**  
Orazio Giustolisi, Daniele Biagio Laucelli, Luigi Berardi, Antonietta Simone
- 38 Un approccio metodologico per la manutenzione predittiva nelle reti di distribuzione idrica urbana**  
Franco Cicirelli, Maria Antonietta Panza, Andrea Vinci, Antonio Guerrieri, Qimeng Li
- 39 Una procedura per la diagnosi di sistemi di condotte in pressione mediante prove in moto vario**  
Bruno Brunone, Caterina Capponi, Debora Falocci, Silvia Meniconi
- 40 RETURN Virtual TestBed: il processo di costruzione della rete di distribuzione idrica di Returnville Coastal**  
Lorenzo Carmelo Zingali, Cristiana Bragalli
- 41 Modellazione del deterioramento e valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture di distribuzione idrica: Proof of Concept di Parma**  
Lorenzo Carmelo Zingali, Alessandro Lombardini, Cristiana Bragalli
- 42 Simulazione estensiva ed automatizzata con Infoworks WS Pro per guidare gli investimenti nelle reti di distribuzione idrica**  
Luisa Lavallo, Maria Luisa Villani
- 43 Metodologie integrate per l'indagine, l'analisi e la valutazione della vulnerabilità arginale ai fenomeni di erosione retrogressiva da sottofiltrazione**  
Guido Gottardi, Ilaria Bertolini, Michela Marchi
- 44 Sviluppo di una Metodologia di Gestione del Rischio NaTech Basata sulla Resilienza: Esempio di Applicazione alle Infrastrutture Critiche Energetiche**  
David Javier Castro Rodriguez, Antonello A. Barresi, Micaela Demichela
- 45 Analisi dei disastri NaTech e valutazione del rischio per la resilienza delle infrastrutture industriali**  
Chiara Vianello, Giulia De CET, Elena Capasso, Almerinda Di Benedetto, Micaela Demichela, Antonello Barresi, Morena Vitale, David Javier Castro Rodriguez, Francesca Da Porto
- 46 Valutazione multi-pericolo in contesti territoriali complessi: proposta metodologica applicata agli impianti di depurazione**  
Maria Castiglione, Santo Fabio Corsino, Michele Torregrossa
- 47 Tool per l'estrazione multi-scala e la selezione semi-automatica di feature geometriche da nuvole di punti per il monitoraggio delle infrastrutture**  
Alessandra Spadaro



**48 Indagini integrate e realtà aumentata a supporto della resilienza delle gallerie:  
il caso studio di San Lorenzo**

Roberta Zambrini, Andrea Zamariolo, Giulia Casagrande, Davide Martinucci, Marco Possamai, Caterina Zei, Cristian Pieroni, Lisa Borgatti, Pietro Festi, Luca Vittuari, Stefano Gandolfi, Alessandra Tini, Matteo Cappuccio, Gianluca Marcato, Angelo Ballaera, Nicolò Bertone, Mirko Francioni

**49 IULIAN: la piattaforma AI per l'accesso guidato e semplificato alle informazioni da dati satellitari**

Matteo Rolle, Luca Salerno, Luca Monaco

**50 Monitoraggio MT-InSAR di infrastrutture di trasporto attraverso analisi cinematica cell-based: Architettura e Workflow del progetto ARTEMON-BT (Advanced Remote TEchniques for MONitoring of Bridges and Tunnels)**

Raffaele Nutricato, Davide Oscar Nitti, Filomena Ciola, Alessandro Parisi, Marco Savoia, Raffaele Landolfo, Andrea Miano

**51 Rheticus® Safeway: sistema Web-GIS automatico per la reportistica e l'analisi delle infrastrutture basate su dati SAR (Interferometria SAR Multi-Temporale)**

Anita Zingaro, Carmelo Maria Fabiano, Corrado Pisani, Flavio D'Ippolito, Marina Zingaro, Michele Antonicelli, Raffaele Borrelli, Sergio Samarelli, Teresa Fazio, Vincenzo Barbieri, Vincenzo Laurino, Vincenzo Massimi

**52 Valutazione strutturale di ponti critici attraverso prove di carico continue: il primo corridoio italiano per i trasporti eccezionali**

Alessia Abbozzo, Gabriele Cazzulani, Loris Vincenzi, Marco Savoia, Michele Gervasio, Agata Quattrone, Lorenzo Hofer, Mariano A. Zanini, Carlo Pellegrino, Marco di Prisco

**53 Valutazione del rischio delle infrastrutture esposte a fenomeni naturali: il ruolo della robustezza strutturale**

Alessio Rubino, Valerio De Biagi, Bernardino M. Chiaia

**54 Manutenzione predittiva di ponti a struttura metallica soggetti a fatica e degrado**

Aldo Milone, Alessandro Prota, Raffaele Landolfo

**55 Analisi multi-rischio delle reti stradali montane**

Francesca da Porto, Luca Badin, Elisa Saler, Andrea Gennaro, Marco Donà, Ascanio Rosi, Daniele P. Viero, Carlo Gregoretti, Leonardo Maria Giannini, Fabio Rollo, Carlo Esposito, Diego Di Martire, Silvio Coda, Giuseppe Bausilio, Giulia La Porta, Marina Pirulli, Pier Francesco Giordano, Riccardo Liuzzo, Maria Pina Limongelli

**56 Simulazione multirischio per la resilienza delle infrastrutture ferroviarie**

Luisa Lavalle, Daniele Fava

**57 Il sistema di supporto alle decisioni per l'analisi di rischio dinamica nelle gallerie stradali**

Davide Berardi, Marta Galuppi, Alessio De Angelis, Mara Lombardi

**58 Innovazione e Industrializzazione nella Rigenerazione delle Infrastrutture: l'Applicazione alla Galleria Poderuzzo**

Carlo Alessio, Lapo Baccolini, Andrea Poli, Marilisa Conte

**59 Safety & Operations Training Hub: training immersivo per infrastrutture critiche**

Francesca Maria Ugliotti, Muhammad Daud, Maria Castiglione, Michele Torregrossa





# Bias-adjustment dei dati meteomarini a supporto dell'analisi di rischi costieri

Sara Tuozzo<sup>1</sup>, Carlina Codato<sup>2</sup>, Mariano Buccino<sup>1</sup>, Mario Calabrese<sup>1</sup>, Andrea Lira Loarca<sup>3</sup>, Giovanni Besio<sup>3</sup>, Paolo De Girolamo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia, [sara.tuozzo@unina.it](mailto:sara.tuozzo@unina.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Roma La Sapienza, Roma, Italia

<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università di Genova, Genova, Italia

La valutazione dei rischi costieri rappresenta una sfida importante per la comunità scientifica e ingegneristica, soprattutto in virtù del previsto innalzamento del livello medio mare e della possibile variazione degli eventi estremi legati al cambiamento climatico. Prerequisito fondamentale per una corretta e appropriata stima di tali rischi è l'utilizzo di dati meteomarini affidabili, i quali possono essere ricavati da misure dirette o stime indirette. Nel primo caso si fa riferimento alle misure ottenute mediante boe ondametrichi, le quali forniscono i dati più affidabili, sebbene si tratti di dati puntuali e che spesso presentano lacune nelle serie temporali. Per quanto concerne le misure indirette, invece, si fa riferimento ai dati meteomarini ottenuti da modelli numerici; tali dati non soffrono dei limiti tipici delle misure ondametrichi, ma sono spesso caratterizzati da bias.

Pertanto, nell'ambito dello Spoke TS2 ed in collaborazione con lo Spoke VS1, è stata effettuata un'attenta analisi dei dati meteomarini disponibili (comprendenti misure dirette e indirette, dati di rianalisi e proiezioni storiche e future), volta successivamente a correggere eventuali sovrastime o sottostime sistematiche che influenzano i dati del modello. L'analisi ha interessato le misure ondametrichi fornite dalla Rete

Ondametrica Nazionale dell'ISPRA e da altre Autorità Locali, insieme a tre diversi dataset di modelli numerici: rianalisi globale ERA5; rianalisi di Copernicus Marine Service (CMEMS) e dataset di hindcast del MeteOcean Research Group, disponibile sia su griglia regolare che non strutturata, insieme alle proiezioni climatiche storiche e future basate sullo scenario di cambiamento climatico RCP 8.5. Le misure ondametrichi sono state utilizzate come dati di riferimento nella procedura di *bias-adjustment*.

Nello specifico, sono stati eseguiti due diversi approcci di correzione: il primo riguarda il metodo di *Distribution Mapping*, il quale ha interessato soltanto la variabile di altezza d'onda significativa, mentre con il metodo *Dynamical Optimal Transport Correction* si è proceduto ad una correzione bivariata di altezza d'onda significativa e periodo di picco. Entrambe le procedure sono state applicate stagionalmente, così da tener conto della variabilità intra-annuale del clima ondoso.

Le suddette correzioni hanno notevolmente migliorato i dati di modello, garantendo una maggiore coerenza con le misure ondametrichi in termini di proprietà statistiche. Infine, i dataset ottenuti sono stati raccolti in un unico database reso disponibile per la comunità scientifica e i vari utenti interessati.



# L'influenza del cambiamento climatico sulla progettazione di opere marittime

Carolina Codato<sup>1</sup>, Myrta Castellino<sup>1</sup>, Paolo De Girolamo<sup>1</sup>, Davide Pasquali<sup>2</sup>, Marcello Di Risio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Sapienza Università di Roma, Roma, Italia, [carolina.codato@uniroma1.it](mailto:carolina.codato@uniroma1.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria civile, edile - architettura e ambientale, Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila, Italia

La crescente evidenza degli impatti del cambiamento climatico sui parametri meteomari pone nuove esigenze nella progettazione e nella gestione delle opere costiere. La disponibilità di dataset climatici di lungo periodo, reanalisi e proiezioni future consente oggi di quantificare l'evoluzione degli estremi di moto ondoso e dell'innalzamento del livello del mare, ma richiede parallelamente procedure robuste di validazione rispetto alle osservazioni del passato. In questo contesto, la calibrazione di dati prodotti da modelli numerici gioca un ruolo decisivo nel garantire la coerenza tra il clima ondoso presente e quello futuro simulato, permettendo di incorporare nelle scelte progettuali variazioni attese sia nei valori estremi di altezza d'onda sia nel livello del mare, con un'attenzione crescente ai possibili cambiamenti nella direzione ed alla distribuzione energetica del moto ondoso incidente. Il contributo propone un approccio integrato alla progettazione e alla verifica di opere di difesa e infrastrutture portuali, basato su una calibrazione multi-step degli estremi. Tale procedura di calibrazione dei dati di moto ondoso e livello marino consente di trasferire l'informazione tra serie di dati del clima passato e scenari futuri, riducendo l'incertezza nella stima degli estremi. Come riferimento per la calibrazione si utilizzano i dati osservati da boe ondometriche e stazioni mareografiche, si corregge progressivamente il bias nei dati di reanalisi fino ad arrivare ai dati di proiezione futura basati sugli scenari di cambiamento climatico. Tale metodo permette di analizzare in modo più robusto gli estremi delle proiezioni di altezza d'onda significativa e dei livelli, riducendone l'incertezza associata. Le variazioni attese negli eventi estremi, come l'aumento dei livelli di storm sur-

ge, la maggiore frequenza degli eventi estremi di moto ondoso e la possibile modifica della direzione del moto ondoso prevalente, comportano significative implicazioni progettuali. Tali cambiamenti influenzano infatti il dimensionamento, la stabilità, la durabilità e la funzionalità delle opere costiere e portuali. I risultati evidenziano l'importanza di un approccio progettuale adattativo, basato su metriche climatiche aggiornate e sulla revisione dei parametri di progetto. In un contesto di innalzamento del livello medio del mare e di potenziale intensificazione degli eventi estremi meteo-marini, risulta essenziale valutare in modo proattivo l'adeguamento delle opere esistenti e definire criteri progettuali resilienti per le nuove realizzazioni. L'integrazione tra osservazioni, modellistica e scenari climatici permette di supportare decisioni informate, orientate a garantire la sicurezza, la continuità operativa e la sostenibilità delle infrastrutture costiere nel lungo periodo. Inoltre, i risultati mostrano che l'adozione di parametri climatici non calibrati può condurre a sottostime o sovrastime significative del rischio. In un contesto di innalzamento del livello medio del mare e di possibili incrementi della severità degli eventi estremi, è necessario valutare con criteri oggettivi se le opere esistenti possano essere adeguate tramite interventi di adattamento (sopraelevazioni, rinforzi, modifiche funzionali) o se, al contrario, gli scenari futuri impongano la progettazione ex novo di opere più resilienti. L'integrazione strutturata tra dati osservati, modellistica numerica e scenari climatici consente di supportare decisioni strategiche basate su evidenze quantitative, riducendo l'incertezza e migliorando la sicurezza e la sostenibilità delle infrastrutture costiere nel lungo periodo.





# Mitigazione della vulnerabilità combinata sisma-tsunami delle infrastrutture

Maria Concetta Oddo<sup>1</sup>, Liborio Cavaleri<sup>1</sup>, Anthea Amato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università di Palermo, Palermo, Italia, [mariacconcetta.oddoo1@unipa.it](mailto:mariacconcetta.oddoo1@unipa.it)

Negli ultimi anni, la comunità scientifica ha mostrato un interesse sempre più crescente verso la valutazione della fragilità multirischio delle infrastrutture esposte ad eventi naturali eccezionali. Un'analisi approfondita della letteratura evidenzia come gli eventi più catastrofici si verifichino frequentemente in combinazione con altri. Tra questi, gli tsunami risultano spesso innescati da altri eventi naturali quali frane sottomarine, eruzioni vulcaniche e, in particolare, terremoti, che rappresentano circa l'80% delle principali cause di generazione degli tsunami a livello globale. In questo scenario, valutare la fragilità delle infrastrutture in condizioni multirischio risulta fondamentale per lo sviluppo di strategie di mitigazione efficaci.

Il presente studio propone una strategia di mitigazione innovativa per infrastrutture esposte al rischio combinato sisma-tsunami, basata sull'impiego di dissipatori ad attrito variabile (Variable Friction Dampers, VFD), detti anche "dissipatori smart", con l'obiettivo di ridurre la probabilità di collasso sotto carichi sequenziali indotti da terremoto e tsunami. In generale, i dispositivi di dissipazione ad attrito vengono progettati per dissipare l'energia associata ai carichi dinamici, limitando gli spostamenti strutturali e migliorando la duttilità in condizioni estreme. L'idea centrale di questo lavoro è quella di sfruttare i benefici offerti dai VFD durante l'azione sismica per ridurre la fragilità delle infrastrutture, in particolare dei ponti,

nei confronti dell'azione successiva dello tsunami. La riduzione degli spostamenti e il miglioramento della duttilità, durante il terremoto, consentono infatti di contenere il danno sismico e di migliorare la capacità strutturale residua, sotto il successivo carico da tsunami.

A tal fine, viene adottata una procedura basata su simulazioni Monte Carlo, che prevede l'esecuzione di due analisi in sequenza: un'analisi dinamica nel dominio del tempo (Time History Analysis, THA) per simulare l'azione sismica e un'analisi Push-Over (PO) allo scopo di riprodurre il carico da tsunami. La metodologia permette di tenere in conto la perdita di rigidità e resistenza indotta dall'azione dinamica nella valutazione degli effetti successivi dello tsunami. I risultati vengono poi elaborati per derivare le curve di fragilità, espresse in termini di probabilità di collasso in funzione della profondità di inondazione dello tsunami. I risultati mostrano che l'introduzione dei dissipatori ad attrito variabile riduce significativamente la probabilità di collasso indotta dal sisma; inoltre, grazie alla forza di attrito variabile, i VFD risultano efficaci su un ampio intervallo di valori di accelerazione di picco al suolo (PGA). In presenza di grandi spostamenti, l'insorgenza del collasso sotto il successivo carico da tsunami risulta ritardata, contribuendo a una mitigazione complessiva degli effetti combinati nelle condizioni di multirischio.





# Mappatura ad alta risoluzione della pericolosità del vento e del rischio indotto sulle infrastrutture critiche

Lorenzo Raffaele<sup>1</sup>, Luca Bruno<sup>1</sup>, Elisabetta Colucci<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GeoWindy R&D group, Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [elisabetta.colucci@polito.it](mailto:elisabetta.colucci@polito.it)

I venti estremi sono generalmente rappresentati a scala macroscopica (centinaia di km) utilizzando serie temporali provenienti da stazioni anemometriche a terra. La velocità di progetto del vento in un sito specifico è solitamente determinata dal progettista sulla base del cosiddetto *return criterion*. Tuttavia, questo approccio presenta significative limitazioni, tra cui la distribuzione irregolare e disomogenea delle stazioni anemometriche, le incertezze di misura, una valutazione soggettiva della rugosità del suolo e incoerenze tra normative nazionali. Questo studio propone una nuova metodologia che valuta direttamente la pericolosità del vento alla scala meso- $\gamma$  ( $\approx 2$  km di risoluzione), sfruttando dati ad alta risoluzione ottenuti tramite *downscaling* di modelli di rianalisi. Le mappe della velocità del vento relative all'Italia, senza precedenti per la loro risoluzione, sono confrontate rigorosamente con le misure provenienti da 21 stazioni anemometriche di riferimento.

Abbiamo quindi sviluppato due approcci modellistici per valutare il rischio indotto dal vento sulle infrastrutture critiche. In primo luogo, viene introdotto un me-

todo alla mesoscala basato su indici, finalizzato a valutare e mappare il rischio di caduta alberi lungo le linee ferroviarie della rete calabrese. L'indice di pericolosità del vento deriva dalla mappatura delle velocità estreme; quello di esposizione degli alberi è quantificato in base alle caratteristiche dell'uso del suolo e l'indicatore di vulnerabilità degli alberi è definito tramite soglie critiche di velocità del vento.

Questo metodo consente un'identificazione rapida, su base quantitativa e relativa, dei segmenti a maggior rischio. In secondo luogo, viene proposto un approccio probabilistico completo per valutare e mappare il rischio di collasso delle torri a traliccio dell'alta tensione. Le curve di pericolosità sono ottenute dai modelli di rianalisi; l'esposizione è definita sulla base delle reti elettriche italiane e svizzere; la vulnerabilità è modellata tramite curve di fragilità disponibili in letteratura. Questo framework consente la stima quantitativa delle probabilità di collasso sia di strutture isolate sia di intere linee, consentendo la progettazione, mitigazione o rilocalizzazione di infrastrutture critiche.





# Allagamenti pluviali in ambiente urbano: un'analisi dinamica applicata alla città di Roma

Edna Jessica Wilches Kochinski<sup>1</sup>, Sabrina Lanciotti<sup>1</sup>, Benedetta Moccia<sup>1</sup>, Elena Ridolfi<sup>1</sup>,  
Fabio Russo<sup>1</sup>, Francesco Napolitano<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Roma La Sapienza, Roma, Italia, [benedetta.moccia@uniroma1.it](mailto:benedetta.moccia@uniroma1.it)

Le alluvioni pluviali urbane rappresentano una minaccia crescente nelle aree densamente urbanizzate, dove l'interazione tra precipitazioni intense, topografia e attività antropiche amplifica il rischio. In questo studio proponiamo un approccio dinamico per la valutazione del rischio da alluvioni pluviali urbane, integrando in un unico framework la pericolosità idraulica, la vulnerabilità edilizia e l'esposizione temporale della popolazione. L'analisi è condotta in un'area centrale della città di Roma, storicamente affetta da allagamenti causati dall'esonazione del Tevere. Si tratta di una zona strategica, situata tra il quartiere Flaminio e il Foro Italico, che ospita importanti strutture sportive, culturali e istituzionali (Auditorium, Stadio Olimpico e Ministero degli Esteri).

Nel framework di rischio dinamico proposto, la pericolosità è stimata mediante il modello Rain-on-Grid di HEC-RAS 2D, simulando eventi di pioggia sintetici con tempo di ritorno di 50 anni e differenti durate. L'impatto sul deflusso degli ostacoli urbani, come autoveicoli e cassonetti, è valutato attraverso un'analisi di sensibilità del modello alle variazioni di scabrezza stradale. I risultati evidenziano che eventi di maggiore durata generano accumuli significativi, con altezze idriche superiori a 0.5 m in aree depresse e parcheggi, mentre le variazioni di scabrezza influenzano localmente la classificazione della pericolosità.

La vulnerabilità edilizia, valutata mediante un'analisi multicriterio, mostra una prevalenza di edifici residenziali datati e fragili, pertanto classificati ad alta vulnerabilità. L'esposizione è modellata dinamicamente considerando coefficienti orari di occupazione per nove categorie funzionali (ospedali, uffici, scuole, residenziale, ristoranti, strutture sportive e ricreative, Stadio Olimpico e altre), evidenziando forti variazioni spazio-temporali. In particolare, emergono picchi di rischio a metà giornata, associati all'attivazione di strutture culturali in aree a elevata pericolosità, nonché incrementi serali, legati a eventi sportivi.

Le mappe di rischio dinamico mostrano che i grandi assembramenti e le aree depresse costituiscono fattori determinanti, amplificando le disparità spaziali e generando cluster di rischio estremo. L'analisi di scenario conferma che l'attivazione di impianti sportivi può triplicare la popolazione colpita rispetto alle condizioni ordinarie. Questi risultati sottolineano la necessità di integrare nei piani di gestione di rischio la distribuzione temporale e la pianificazione di eventi, promuovendo lo sviluppo di protocolli di allerta mirati per orario e localizzazione. Il framework proposto, basato su dati a libero accesso e metodologie replicabili, fornisce un contributo innovativo per la resilienza urbana ed è potenzialmente trasferibile ad altri contesti urbani.





# VAPIweb: un WebGIS per la valutazione delle piogge e delle piene di progetto in Italia

Pietro Bogoni<sup>1</sup>, Paola Mazzoglio<sup>1</sup>, Pierluigi Claps<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [pietro.bogoni@polito.it](mailto:pietro.bogoni@polito.it)

Il VAPI (Valutazione delle Piene in Italia) è stato un progetto di ricerca condotto tra il 1985 e il 1995 dal Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR). L'obiettivo primario era la realizzazione di uno studio esteso a tutto il territorio nazionale, che riguardasse sia le piogge estreme sia le piene fluviali di progetto.

L'applicazione pratica dei risultati del progetto non è mai stata semplice. Le informazioni sono infatti distribuite in numerosi volumi cartacei frammentati e le formulazioni matematiche richieste risultano spesso complesse per utenti non esperti. Con VAPIweb si intende tradurre il rigore metodologico di questo progetto in uno strumento operativo moderno e fruibile e supportare gli utenti meno esperti, offrendo uno strumento semplificato e accessibile per stimare quantili e tempi di ritorno degli eventi idrologici estremi, rendendo la metodologia VAPI molto più facile da utilizzare nelle analisi idrologiche e nella progettazione reale.

Il WebGIS è stato realizzato utilizzando la G3W-Suite di Gis3W ed è articolato in due moduli distinti ma complementari: il WebGIS - VAPI Piogge e il WebGIS - VAPI Portate.

Il modulo *Piogge* fornisce strumenti di *geoprocessing* che permettono di analizzare i valori di precipitazione di progetto per le durate standard di 1, 3, 6, 12 e 24 ore. La metodologia alla base del calcolo per i massimi idrologici è, per la maggior parte dell'Italia, il modello probabilistico a doppia componente TCEV (Two-Component Extreme Value). Per la sottozona omogenea del Nord-Ovest (Pie-

monte, Lombardia, Liguria e Valle d'Aosta) viene invece utilizzata la distribuzione GEV (Generalized Extreme Values). All'interno della piattaforma sono disponibili due algoritmi di *geoprocessing*, applicabili sia a un caso puntuale che a un caso areale, che consentono:

- il calcolo delle curve di possibilità pluviometrica (CPP) dati durata e periodo di ritorno;
- la stima del periodo di ritorno a partire da un evento considerato.

Il modulo *Portate* si concentra invece sulla valutazione delle portate al colmo di piena. La piattaforma mette a disposizione un algoritmo di *geoprocessing* per il calcolo della portata di progetto per un bacino selezionato e un determinato periodo di ritorno.

Il progetto non si è limitato alla realizzazione della piattaforma, ma ha anche permesso di uniformare le diverse analisi regionali, migliorandone la fruibilità e l'omogeneità a livello nazionale. Questa fase è stata anche l'occasione per riconfermare e validare il grande lavoro svolto durante il progetto VAPI. L'infrastruttura WebGIS VAPI rappresenta quindi un importante strumento operativo in quanto rende accessibili e applicabili i risultati di uno studio idrologico complesso su scala nazionale. La capacità del WebGIS di eseguire complesse funzioni di *geoprocessing*, per analisi puntuali o areali, assicura che i dati di progetto (altezze di pioggia e portate al colmo) utilizzati per la pianificazione possano essere valutati in maniera speditiva ma che al contempo siano basati su una metodologia scientificamente rigorosa e spazialmente coerente.



# Catalogo delle piene dei corsi d'acqua italiani

Pierluigi Claps<sup>1</sup>, Daniele Ganora<sup>1</sup>, Giulia Evangelista<sup>1</sup>, Paola Mazzoglio<sup>1</sup>, Pietro Bogoni<sup>1</sup>,  
Marco Demateis Raveri<sup>1</sup>, Irene Monforte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [pierluigi.claps@polito.it](mailto:pierluigi.claps@polito.it)

Nel 2020 sono stati pubblicati i primi tre volumi del "Catalogo delle piene dei corsi d'acqua italiani", la prima iniziativa nazionale dedicata a raccogliere in modo sistematico e omogeneo i dati sulle portate massime annue dei corsi d'acqua italiani. Quel lavoro ha rappresentato un passo importante per mettere ordine a un patrimonio informativo spesso disperso o non facilmente confrontabile, fornendo una base dati unica a supporto delle analisi idrologiche e della gestione del rischio alluvionale.

A distanza di alcuni anni, nel 2025, il Catalogo viene aggiornato con la seconda edizione del Volume 1 (dedicata al Distretto Idrografico Padano). Questa nuova versione consolida e arricchisce il volume di dati precedentemente disponibile, riportando osservazioni che risalgono fino agli anni '20, derivate in gran parte dalle storiche Pubblicazioni n. 17 e dagli Annali Idrologici del Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SIMN).

Il Volume 1 è uno dei tre volumi che, nel loro complesso, documentano 799 bacini italiani. Nello specifico, questa edizione include 395 stazioni di misura all'interno del Distretto Idrografico Padano, suddivise tra gli ex compartimenti di Parma e Bologna (Figura 1). L'aggiornamento ha permesso di arricchire il dataset, raggiungendo una disponibilità temporale fino al 2024. Il lavoro di compi-

lazione è stato affiancato da un'accurata revisione dei dati già pubblicati, con la correzione di errori e incongruenze, fondamentale per l'affidabilità delle analisi di rischio.

Per ciascuna stazione di misura, sono fornite due schede informative dettagliate che includono descrittori della stazione, dati idrometrici (portate massime annuali e al colmo di piena) e descrittori sintetici del bacino sotteso (caratteristiche geomorfologiche e climatiche).

In sintesi, l'approccio metodologico rigoroso adottato, che ha incluso il lavoro di raccolta e armonizzazione dei dati storici di piena, rende il Catalogo uno strumento informativo di riferimento a livello nazionale, fornendo una base dati solida e organizzata, necessaria per la valutazione del rischio alluvionale.

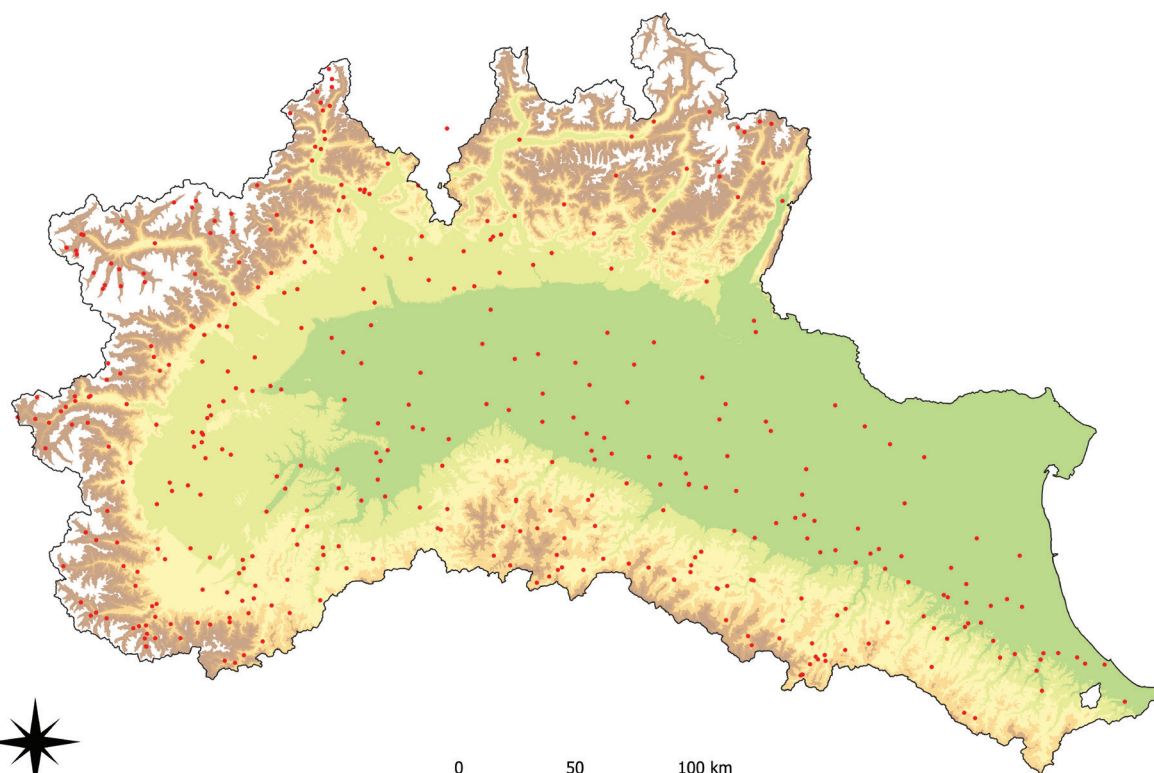


Figura 1  
Sezioni di chiusura dei bacini  
presenti nel Catalogo delle  
piene dei corsi d'acqua  
italiani, Volume 1.



# FOCA (Italian FLOOD and Catchment Atlas): l'atlante delle piene e dei descrittori dei bacini idrografici italiani

Pierluigi Claps<sup>1</sup>, Giulia Evangelista<sup>1</sup>, Daniele Ganora<sup>1</sup>, Paola Mazzoglio<sup>1</sup>, Irene Monforte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [pierluigi.claps@polito.it](mailto:pierluigi.claps@polito.it)

Negli ultimi anni, l'interesse della comunità idrologica per dataset nazionali di descrittori geomorfoclimatici è cresciuto rapidamente, portando alla realizzazione di prodotti sempre più completi e standardizzati. Tra gli esempi più significativi figurano i dataset della famiglia CAMELS (oggi integrati nell'iniziativa Caravan), insieme ai dataset LamaH-CE e BULL. Con l'obiettivo di colmare una storica lacuna per il territorio italiano, in questo lavoro presentiamo FOCA (Italian FLOOD and Catchment Atlas; <https://doi.org/10.5194/essd-16-1503-2024>), la prima raccolta sistematica e omogenea di informazioni sui 631 bacini idrografici italiani per i quali sono disponibili serie storiche di portate al colmo e/o massime giornaliere. FOCA arricchisce queste informazioni idrometriche con oltre cento descrittori relativi a geomorfologia, caratteristiche del suolo, uso e copertura del suolo, vegetazione, clima e precipitazioni estreme. Una rappresentazione di due descrittori inclusi nel dataset è contenuta in Fig. 1. La selezione delle variabili e delle fonti utilizzate segue tre criteri fondamentali: copertura spaziale nazionale, assenza di distorsioni regionali e adeguata risoluzione spaziale. Per ogni descrittore è stato scelto il dataset di riferimento più affidabile disponibile, privilegiando risorse nazionali e ricorrendo a dataset globali solo quando strettamente necessario. La disponibilità dei confini di bacino in formato vettoriale consente inoltre agli utenti di calcolare ulteriori variabili utilizzando metodologie proprie o integrando dataset esterni. Uno degli elementi distintivi di FOCA rispetto ad altri

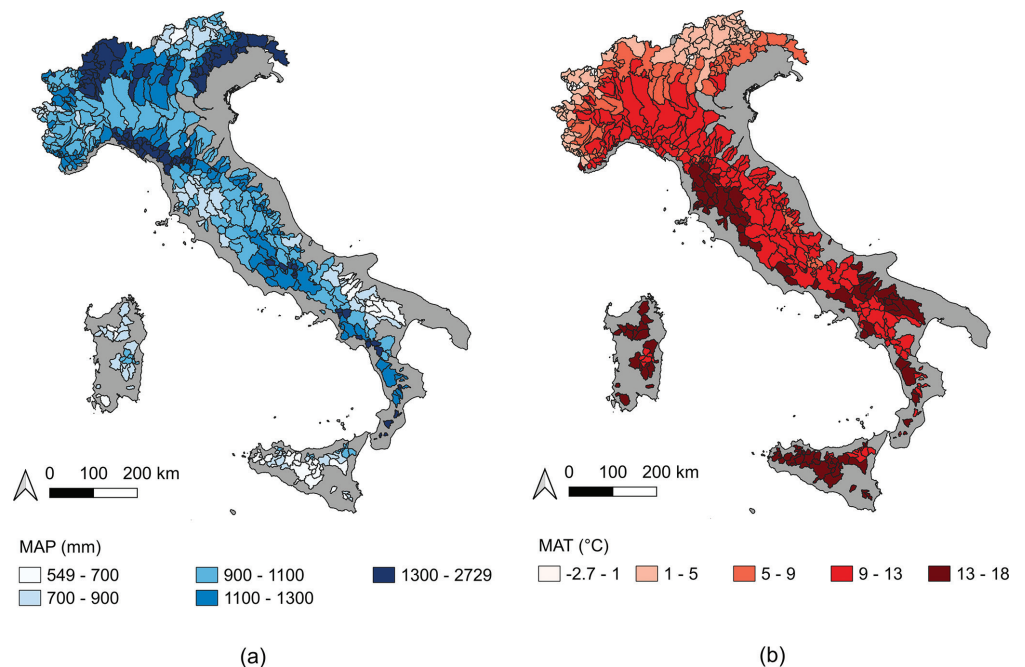


Figura 1 - Valori medi della pioggia media annua (MAP) e della temperatura media annua (MAT) per i 631 bacini inclusi in FOCA. Dati scaricabili da <https://doi.org/10.5281/zenodo.8060736>. Fonte: <https://doi.org/10.5194/essd-16-1503-2024>.

dataset è l'inclusione di un ampio e robusto insieme di descrittori geomorfologici, sottoposti a rigorose procedure di controllo qualità. Un secondo punto di forza è rappresentato dall'uso di dati pluviometrici osservati da stazioni per la stima dei descrittori di precipitazione estrema, superando l'approccio basato su rianalisi comunemente adottato nella costruzione dei dataset CAMELS. A tale scopo è stato impiegato l'Improved Italian - Rainfall Extreme Dataset (I<sup>2</sup>-RED), il più aggiornato archivio nazionale di estremi di precipitazione, costruito grazie a un estensivo lavoro di data rescue e armonizzazione di oltre 5000 serie storiche.



# Evoluzione temporale delle piogge estreme in Italia: uno sguardo d'insieme basato su dati e metodi aggiornati

Paola Mazzoglio<sup>1</sup>, Alberto Viglione<sup>1</sup>, Daniele Ganora<sup>1</sup>, Pierluigi Claps<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [paola.mazzoglio@polito.it](mailto:paola.mazzoglio@polito.it)

Comprendere come gli eventi di pioggia estrema stiano evolvendo nel tempo è fondamentale per la progettazione delle infrastrutture, la valutazione del rischio idrologico e la definizione di efficaci strategie di adattamento al cambiamento climatico. In un Paese complesso come l'Italia, caratterizzato da una forte variabilità orografica e da condizioni meteorologiche eterogenee, l'identificazione di tendenze coerenti su scala nazionale rappresenta una sfida significativa.

In questo studio, l'evoluzione temporale degli estremi di precipitazione di breve durata (da 1 a 24 ore) viene analizzata utilizzando il più ampio e aggiornato archivio di massimi annuali disponibile per l'Italia: I<sup>2</sup>-RED, Improved Italian - Rainfall Extreme Dataset. Il database, basato esclusivamente su misure osservate al suolo, comprende oltre 5000 serie pluviometriche e copre un periodo che va dal 1916 al 2022. L'uso esclusivo di osservazioni dirette evita le incertezze tipiche dei dati di rianalisi o dei modelli climatici, spesso limitati nella risoluzione spaziale e nella capacità di riprodurre eventi estremi.

La metodologia utilizzata per la valutazione delle variazioni temporali è la quantile regression, applicata a scala italiana utilizzando un approccio a finestra mobile per aggregare le serie disponibili attorno a ciascun punto, consentendo quindi di utilizzare anche record recenti inclusi in serie storiche brevi.

I risultati evidenziano una notevole eterogeneità nelle variazioni degli estremi di pioggia sul territorio nazionale. Complessivamente, a scala italiana, i valori mediani (50° percentile) delle precipitazioni di 1 ora aumentano pressoché ovunque, mentre i valori mediani delle precipitazioni di 24 ore presentano pattern regionali distinti. In aggiunta, mentre i valori mediani mostrano cambiamenti contenuti, gli eventi più intensi (95° - 99° percentile) evidenziano variazioni ben più pronunciate. Ciò suggerisce che le precipitazioni estreme più violente stiano diventando più intense in alcune regioni, mentre gli estremi "ordinari" rimangono relativamente stabili.

Queste evidenze hanno implicazioni rilevanti per la progettazione e per la gestione del rischio alluvionale. Esse indicano infatti la necessità di considerare non soltanto le variazioni medie delle precipitazioni, ma anche gli spostamenti nelle code della distribuzione. L'aumento degli eventi più intensi sottolinea l'urgenza di aggiornare le curve di possibilità pluviometrica, soprattutto nelle aree in cui sono stati riscontrati trend positivi significativi. Allo stesso tempo, la presenza di tendenze negative in alcune zone invita alla prudenza. Eventuali riduzioni dei valori di progetto devono essere valutate con attenzione, alla luce delle incertezze associate all'evoluzione futura del clima.



# Mappatura della vulnerabilità al rischio alluvionale tra tempi di risposta idrologica e trend delle piogge estreme

Gianluca Lelli<sup>1</sup>, Paola Mazzoglio<sup>2</sup>, Alessio Domeneghetti<sup>1</sup>, Serena Ceola<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM), Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Bologna, Italia,

[gianluca.elli2@unibo.it](mailto:gianluca.elli2@unibo.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino, Torino, Italia

La vasta estensione e la configurazione lineare della rete ferroviaria italiana implicano un'elevata frequenza di attraversamenti di corsi d'acqua, rendendola particolarmente esposta al rischio alluvionale. Eventuali danni strutturali e interruzioni del servizio in corrispondenza di ponti e viadotti possono avere ripercussioni significative sulla mobilità e sull'economia nazionale. L'obiettivo principale di questo studio è identificare i punti della rete potenzialmente più critici, mettendo in relazione i tempi di risposta idrologica dei bacini drenanti con i trend delle precipitazioni estreme osservati negli ultimi decenni. Integrando dati provenienti da OpenStreetMap e Copernicus EU-Hydro, sono state individuate circa 9.400 intersezioni ferrovia-fiume su tutto il territorio nazionale. Per ciascuna, è stato delimitato il bacino contribuyente utilizzando il modello digitale del terreno EU-DEM (25 m) e l'algoritmo D8. Ognuno di questi è stato caratterizzato in termini di area, lunghezza dell'asta principale e pendenza media. Successivamente, è stato calcolato il tempo di corrivazione, parametro che consente di associare a ciascun bacino una durata critica di precipitazione. I trend delle precipitazioni estreme sono stati estratti dal dataset I<sup>2</sup>-RED, una raccolta storica di massimi annuali di precipitazione per durate di 1, 3, 6, 12 e 24 ore, registrati da oltre 5.500 stazioni sul territorio italiano a partire dal 1916, considerando i quantili 0.5 (eventi ordinari) e 0.95 (eventi estremi). L'analisi rivela una marcata variabilità spaziale nei tempi di corrivazione, che vanno da meno di un'ora nei bacini alpini a più di 20 ore nelle aree di pianura. Inoltre, il 35% circa delle intersezioni ricade nell'intervallo

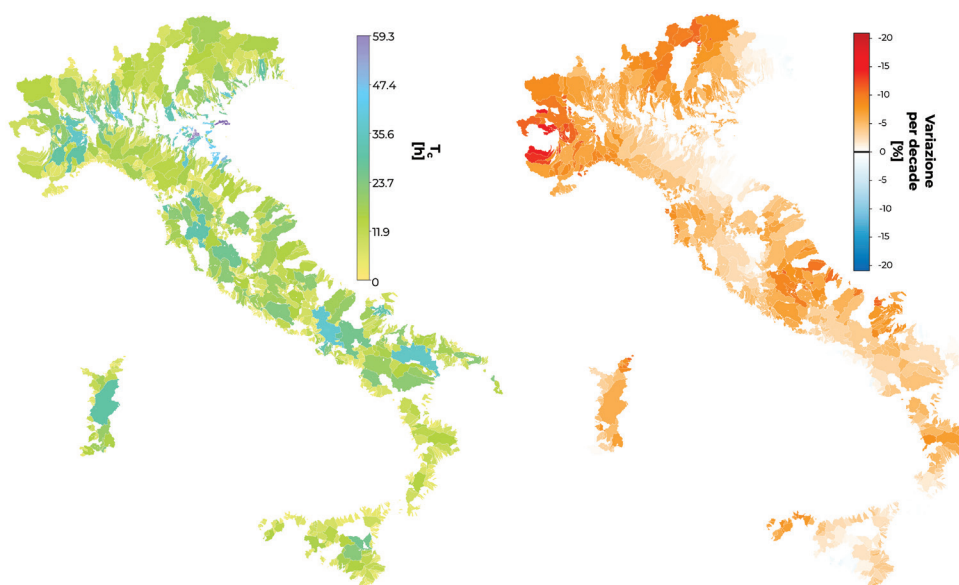


Figura 1 - Analisi spaziale della dinamica dei bacini: a) Distribuzione del tempo di corrivazione relativa alle intersezioni ferrovia-fiume in Italia. b) Variazione percentuale per decade delle precipitazioni estreme per durata 1h al quantile 0.95.

di 2-7 ore, che corrisponde alle durate per cui si osserva la maggiore intensificazione delle precipitazioni estreme a scala nazionale. A titolo d'esempio, si riporta in Figura 1 il confronto tra tempi di corrivazione e le variazioni decennali delle precipitazioni estreme orarie. In conclusione, l'analisi fornisce una mappa dettagliata delle intersezioni ferrovia-fiume più vulnerabili. I risultati sono essenziali per supportare la pianificazione di interventi di mitigazione e per una gestione più consapevole del rischio alluvionale sulla rete ferroviaria.





# Potenziare la resilienza climatica delle infrastrutture strategiche: un approccio innovativo per la stima delle precipitazioni estreme e la modellazione degli impatti idraulici

---

Pietro Devò<sup>1</sup>, Marco Marani<sup>1</sup>, Vincenzo Rotella<sup>2</sup>, Chiara Cesali<sup>2</sup>, Giovanni Cozzuto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università di Padova, Italia, [pietro.devo@dicea.unipd.it](mailto:pietro.devo@dicea.unipd.it)

<sup>2</sup> Italferr - Architettura Ambiente e Territorio - S.O. Ambiente & Energy Saving, Roma, Italia

---

ITALFERR, la società di ingegneria del gruppo Ferrovie dello Stato, necessita di stime affidabili sull'evoluzione delle precipitazioni estreme per valutare le variazioni future delle portate di piena e pianificare misure di adattamento volte a ridurre il rischio idraulico lungo le principali linee ferroviarie.

Il metodo proposto si articola in due fasi. Dapprima, si utilizzano osservazioni pluviometriche per costruire curve Intensità-Durata-Frequenza (IDF), che descrivono il comportamento attuale delle piogge estreme. Successivamente, si impiegano simulazioni climatiche ad alta risoluzione (modelli convection-permitting, CPM) relative a scenari storico e futuro RCP8.5 per stimare le variazioni percentuali dei quantili di precipitazione. Tali fattori di cambiamento vengono applicati alle curve IDF osservate, ottenendo stime

future coerenti con i segnali climatici simulati, ma ancorate ai dati reali.

Dato che i CPM hanno una copertura di pochi anni e non consentono di stimare direttamente eventi rari, si adotta il framework Meta-statistical Extreme Value (MEV), che sfrutta l'intera distribuzione degli eventi pluviometrici per migliorare la stabilità delle stime anche su serie brevi.

La metodologia è stata applicata al bacino del fiume Esino (Marche) per una valutazione del rischio di piena in condizioni climatiche future. Le nuove curve IDF sono state integrate nel modello idrologico del bacino da ITALFERR, evidenziando variazioni nelle aree inondate e nei valori di portata di picco, elementi cruciali per la progettazione di infrastrutture ferroviarie resilienti ai cambiamenti climatici.



# Dai cambiamenti climatici ai cambiamenti delle piene: approccio statistico e di modellazione afflussi-deflussi

---

Alberto Viglione<sup>1</sup>, Luca Lombardo<sup>1</sup>, Luigi Cafiero<sup>1</sup>, Anna Basso<sup>1</sup>, Paola Mazzoglio<sup>1</sup>,  
Daniele Ganora<sup>1</sup>, Pierluigi Claps<sup>1</sup>, Francesco Laio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [alberto.viglione@polito.it](mailto:alberto.viglione@polito.it)

---

Con l'intensificarsi dei cambiamenti climatici, le variazioni estreme di temperatura e precipitazioni sollevano preoccupazioni circa l'aumento del rischio alluvionale. Comprendere e quantificare l'influenza dei cambiamenti climatici sulle piene fluviali è rilevante sia dal punto di vista teorico che pratico. In ambito scientifico, sebbene l'individuazione delle tendenze delle piene sia stata ampiamente studiata, attribuire i cambiamenti a cause specifiche rimane una sfida. Sul lato pratico, invece, sono necessari metodi affidabili per incorporare l'evoluzione delle condizioni climatiche nella quantificazione delle piene di progetto, in particolare nei bacini non dotati di strumentazione, poiché l'analisi statistica tradizionale presuppone la stazionarietà. La ricerca condotta dal Politecnico di Torino all'interno di RETURN verte su questi argomenti. Gli obiettivi sono l'indagine relativa alla rela-

zione tra piene ed eventi climatici estremi, sia a piccola che a grande scala, e lo sviluppo di metodi per collegare le variazioni della curva di frequenza delle piene fluviali alle variazioni di precipitazioni e temperatura. L'area di studio è la Regione Alpina (GAR), che comprende la Pianura Padana nell'Italia settentrionale. Vengono utilizzati sia approcci statistici basati sui dati che modellazione afflussi-deflussi. L'approccio basato sui dati prende in considerazione la sensibilità (elasticità) delle piene alle variazioni degli estremi delle precipitazioni, collegando le curve di frequenza delle piene e le curve di possibilità pluviometrica attraverso relazioni quantile-quantile a scala locale. L'approccio modellistico si basa sull'applicazione di uno schema afflussi-deflussi distribuito, con cui vengono studiate le variazioni nelle caratteristiche degli eventi alluvionali a scala regionale.



# La morfologia dei bacini influenza gli effetti del global warming sulle portate di piena nelle Alpi italiane

Giulia Evangelista<sup>1</sup>, Irene Monforte<sup>1</sup>, Pierluigi Claps<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [giulia.evangelista@polito.it](mailto:giulia.evangelista@polito.it)

In questo studio vengono quantificati i potenziali tassi di variazione dei quantili di piena nei bacini alpini e prealpini italiani, come conseguenza di un innalzamento generalizzato della quota di zero termico. L'analisi si concentra sull'influenza dell'altitudine e della morfologia del bacino, in particolare della forma della sua curva ipsometrica (Fig. 1). L'approccio adottato rappresenta un'evoluzione di una metodologia precedente, che consente di costruire curve di frequenza di piena tenendo conto delle variazioni stagionali della copertura nivale del bacino, riproducendo quindi l'effetto di mitigazione delle precipitazioni a carattere nevoso.

La metodologia originaria è stata migliorata nella descrizione della distribuzione delle quote all'interno dei bacini, superando le limitazioni della funzione semplificata, adottata nella versione iniziale del modello, che non era in grado di rappresentare adeguatamente forme a doppia curvatura. L'approccio aggiornato, denominato *FloodAlp*, permette quindi di valutare sistematicamente il ruolo delle proprietà ipsometriche del bacino nella sensibilità delle piene attuali, con periodo di ritorno di 10 e 100 anni, rispetto a variazioni progressive della quota dello zero termico, estendendo l'analisi a circa 200 bacini dell'intera catena alpina italiana.

I risultati indicano che bacini con quota media superiore ai 2000 metri mostrano una marcata sensibilità all'aumento delle temperature, con potenziali incrementi relativi fino al 18.5% e 21%, rispettivamente, per le piene con periodo di ritorno di 10 e 100 anni, in caso di un riscaldamento di 2°C. Un aumento di 4°C porta questi valori rispettivamente al 35% e 43%. Gli incrementi maggiori dei quantili di piena si concentrano

nelle Alpi occidentali, dove i bacini sono tipicamente più alti in quota e morfologicamente complessi. Lo studio rivela inoltre che differenze anche molto piccole nella forma della curva ipsometrica, a parità di altre caratteristiche di bacino, possono generare notevoli differenze nell'aumento delle piene, fino al 50% per la piena centennale.

Questi risultati evidenziano il ruolo amplificatore della morfologia del bacino nei cambiamenti dei quantili di piena indotti dalla temperatura. In regioni come le Alpi italiane, dove la morfologia dei bacini è piuttosto eterogenea, *FloodAlp* consente valutazioni spazialmente dettagliate della sensibilità delle piene al riscaldamento, fornendo informazioni cruciali per la valutazione futura del rischio di piena in ambienti montani.

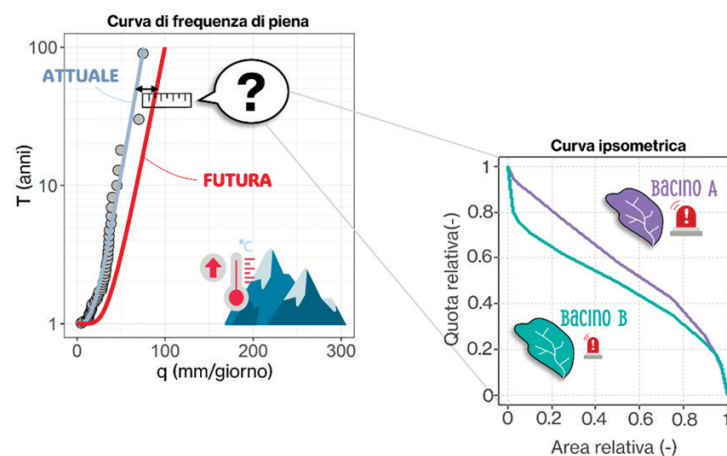


Figura 1 - Effetto dell'incremento di temperatura sulla curva di frequenza di piena e relazione con la forma della curva ipsometriche di bacino.



# TILDE (The Italian Large Dams datasEt): una nuova banca dati sulle grandi dighe italiane e sui bacini idrografici sottesi

Giulia Evangelista<sup>1</sup>, Paola Mazzoglio<sup>1</sup>, Daniele Ganora<sup>1</sup>, Francesca Pianigiani<sup>2</sup>, Pierluigi Claps<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [giulia.evangelista@polito.it](mailto:giulia.evangelista@polito.it)

<sup>2</sup> Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche, M.I.T., Roma, Italia

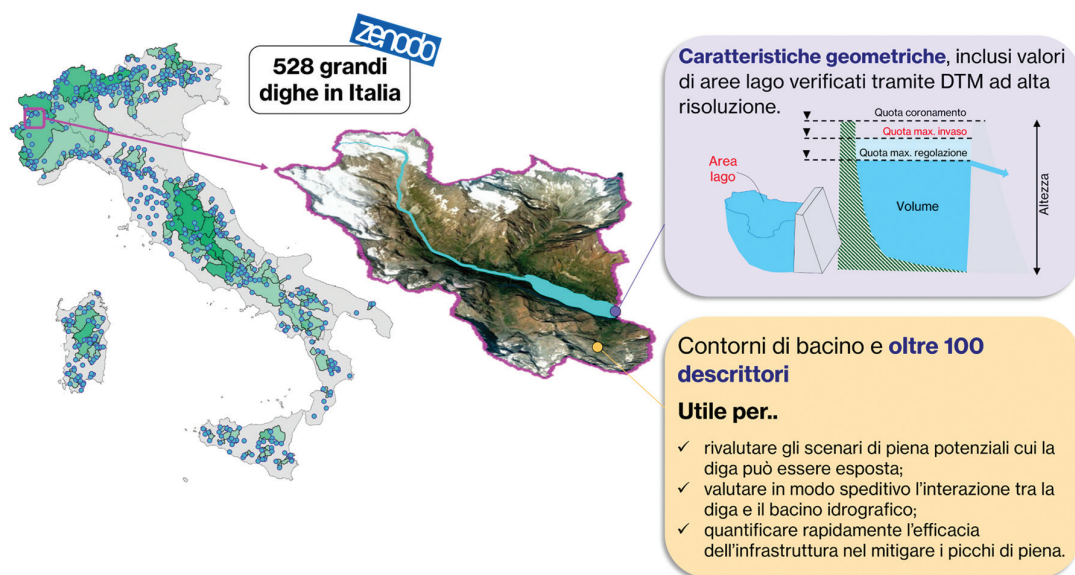


Figura 1 - Distribuzione delle 528 grandi dighe in Italia e principali caratteristiche del dataset TILDE.  
Dati disponibili su: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12818297>

Come molti altri Paesi dell'area mediterranea, anche l'Italia si trova ad affrontare eventi meteorologici estremi sempre più frequenti e intensi, che mettono a rischio la sicurezza delle dighe. I dati idrologici storici potrebbero non essere più rappresentativi delle piene estreme future, rendendo necessario rivedere le portate di progetto degli scarichi di superficie, per adeguarsi alle mutate condizioni idrologiche. La disponibilità di informazioni accurate e aggiornate sulle caratteristiche dei bacini imbriferi sottesi da invasi è quindi essenziale.

TILDE (<https://doi.org/10.5194/essd-17-1407-2025>) è una raccolta dettagliata delle caratteristiche struttu-

rali e dei bacini idrografici per 528 grandi dighe presenti in Italia (Fig. 1). Questo dataset, liberamente accessibile su Zenodo, rappresenta la risorsa più ampia attualmente disponibile sulle dighe italiane, fornendo una base solida per ricercatori, decisori e portatori di interesse coinvolti nella gestione delle risorse idriche e nella pianificazione delle infrastrutture. Include le caratteristiche strutturali di ciascuna diga, come anno di entrata in esercizio, altezza e tipologia, nonché informazioni sul relativo serbatoio, tra cui volume, superficie e usi prevalenti. Uno degli aspetti distintivi di TILDE è la presenza di informazioni sulla

superficie del serbatoio e sulla quota del massimo invaso, elementi cruciali per una valutazione accurata della capacità di laminazione delle portate di piena, raramente inclusi in altri dataset simili, sia a livello nazionale sia internazionale.

Le caratteristiche dei bacini, incluse quelle geomorfologiche, della copertura e dell'uso del suolo; quelle climatiche e i confini dei bacini stessi, sono determinate mediante procedure standardizzate e uniformi, garantendo coerenza su tutto il territorio nazionale. Grazie anche alla disponibilità del dataset "gemello" FOCA (the Italian FIOod and Catchment Atlas), viene fornito un elevato livello di dettaglio per circa un migliaio di bacini in tutta Italia, comprendendo sia bacini sottesi da dighe sia bacini strumentati.



# Elementi chiave per un approccio omogeneo alla valutazione della pericolosità idrologica delle grandi dighe italiane

Giulia Evangelista<sup>1</sup>, Daniele Ganora<sup>1</sup>, Paola Mazzoglio<sup>1</sup>, Francesca Pianigiani<sup>2</sup>, Pierluigi Claps<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [giulia.evangelista@polito.it](mailto:giulia.evangelista@polito.it)

<sup>2</sup> Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche, M.I.T., Roma, Italia

Nell'ambito della valutazione e della gestione del rischio alluvionale, i contributi scientifici degli ultimi anni hanno ampiamente indagato come la risposta idrologica di bacino possa modificarsi anche in presenza di invasi artificiali. Questo studio si propone di delineare in modo sistematico gli aspetti chiave del problema, consentendo valutazioni preliminari, ma il più possibile oggettive, dell'efficacia della laminazione delle portate di piena delle grandi dighe italiane, in funzione delle caratteristiche geometriche delle stesse e della portata di piena generata dal bacino idrografico sotteso, non limitando la ricerca a soluzioni valide esclusivamente per un bacino di riferimento. In questa direzione, viene valutato il potenziale "naturale" di laminazione delle piene di 265 grandi invasi distribuiti su tutto il territorio italiano, attraverso la costruzione di una graduatoria di efficienza di mitigazione. Per mantenere l'omogeneità su un'area così estesa e garantire coerenza e confrontabilità dei risultati, vengono adottate forme di idrogramma standardizzate e la portata di piena in ingresso è stimata tramite il metodo razionale (piena indice), valorizzando i risultati di una recente analisi degli estremi pluviometrici in Italia. L'indice di attenuazione è calcolato risolvendo l'equazione differenziale dei laghi. Sono state derivate ventiquattro diverse piene di progetto, adottando soltanto due forme di idrogramma e un numero minimo di parametri, ossia il coefficiente di deflusso del bacino, il tempo di corrivazione e i parametri delle curve di possibilità pluviometrica (IDF). Uno schema illustrativo dell'impianto metodologico adottato è mostrato in Fig. 1.

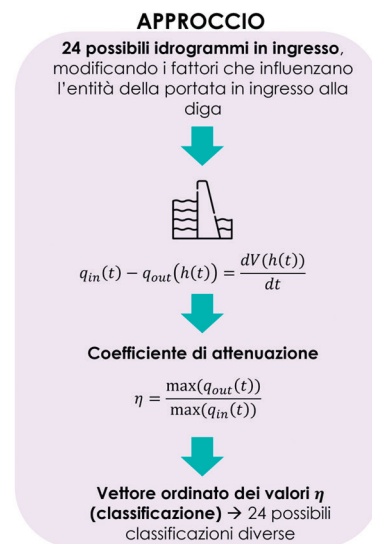
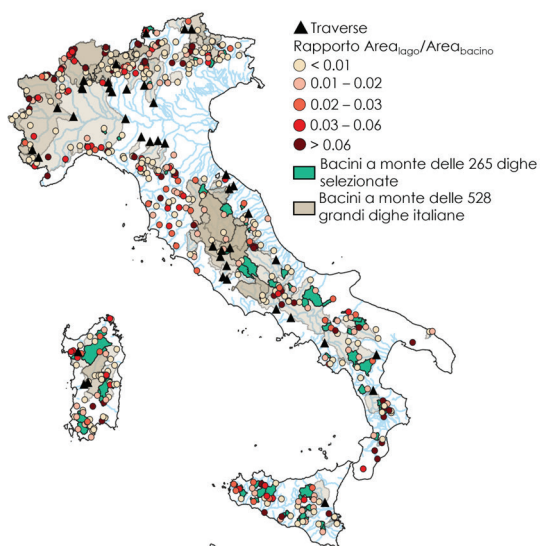


Figura 1 - Distribuzione delle 265 grandi dighe oggetto di indagine e schema illustrativo dell'impianto metodologico adottato

I risultati della classificazione, per tutte le configurazioni testate, mostrano una forte sensibilità alle ipotesi assunte sul tempo di corrivazione e ad alcune caratteristiche delle precipitazioni, mentre la forma dell'idrogramma sembra esercitare un'influenza decisamente minore sull'esito della graduatoria. Inoltre, anche in presenza di combinazioni apparentemente simili tra le caratteristiche dell'infrastruttura e le dimensioni del bacino sotteso, differenze significative nella morfologia del bacino, come pendenze molto basse o particolarmente elevate, possono determinare risultati sostanzialmente diversi.



# Strumenti innovativi per la resilienza delle infrastrutture idriche: il caso studio della diga di Camastra

Monica Corti<sup>1</sup>, Matteo Antelmi<sup>1</sup>, Camilla Crippa<sup>1</sup>, Monica Papini<sup>1</sup>, Laura Longoni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Politecnico di Milano, Milano, Italia, [matteo.antelmi@polimi.it](mailto:matteo.antelmi@polimi.it)

L'erosione e il trasporto dei sedimenti, soprattutto quando innescati da eventi di pioggia estrema, possono rappresentare gravi minacce per la vita umana e per le infrastrutture critiche. L'intensificazione di questi fenomeni, dovuta ai cambiamenti climatici e alla variazione dei regimi di precipitazione, aumenta il rischio per le aree a valle, in particolare in prossimità di centri urbani, ponti e opere idrauliche come dighe. In questo scenario, cresce la necessità di strumenti accurati, adattabili ed efficienti dal punto di vista computazionale, capaci di valutare i rischi legati ai sedimenti, supportare la protezione delle infrastrutture e orientare la gestione a lungo termine dei sedimenti, sia nelle condizioni climatiche attuali, sia in quelle future. Per rispondere a queste esigenze, il Politecnico di Milano ha sviluppato SMART-SED, un modello numerico fisicamente basato e spazialmente distribuito, progettato per simulare processi superficiali poco profondi, tra cui la generazione del deflusso, l'erosione e il trasporto dei sedimenti, alla scala di bacino. Il modello richiede input geomorfologici e meteorologici minimi, spesso reperibili da dataset open source, rendendolo uno strumento pratico e scalabile. SMART-SED è stato testato e validato con successo in diversi contesti, inclusi bacini con differenti composizioni geologiche, pendenze e scale spaziali. La sua flessibilità e adattabilità lo rendono particolarmente adatto a indagare la possibile evoluzione dei processi erosivi e del trasporto di sedimenti sotto regimi pluviometrici variabili, contribuendo a una migliore comprensione di come i processi superficiali possano cambiare in futuro.

In questo lavoro, SMART-SED è stato applicato al caso di studio della diga del torrente Camastra, affluente del fiume Basento, in Basilicata. La diga del Camastra è una risorsa strategica per l'approvvigionamento idrico di Potenza e Matera, oltre che per usi irrigui e industriali. Tuttavia, l'accumulo di sedimenti nel serbatoio rappresenta una criticità per la sua capacità di invaso e per la sostenibilità a lungo termine. Nell'ambito del progetto PNRR, è stato

applicato il modello numerico SMART-SED per simulare i processi di erosione e trasporto solido nel bacino della diga (342 km<sup>2</sup>), caratterizzato da litologie sedimentarie e clima mediterraneo. Sono stati analizzati cinque scenari annuali (2012, 2013, 2017, 2021, 2023), rappresentativi di condizioni pluviometriche medie, minime e massime, considerando gli ultimi venti anni. I risultati sono stati confrontati con il valore medio annuale di sedimenti accumulati nell'invaso, stimato dai dati batimetrici disponibili. Si osserva una buona coerenza con i dati osservati negli anni medi (errore -8%), mentre negli altri casi il modello tende a sovrastimare (+78%) o sottostimare (-44%) il volume di sedimento annuale medio, coerentemente con l'aumento o diminuzione delle precipitazioni. Considerato l'assetto geologico del bacino, caratterizzato da calanchi e frane diffuse, è stato inoltre valutato il contributo potenziale dei depositi di frana all'erosione mediante l'integrazione di maschere a maggiore erodibilità. Sebbene queste simulazioni indichino incrementi fino al +183% di erosione sul bacino, l'aumento relativo del volume di sedimenti nell'invaso risulta solamente del +24%, indicando che la pioggia resta il fattore dominante. Attualmente, il tasso medio di interrimento è di circa  $1,0 \times 10^5$  m<sup>3</sup>/anno e, senza interventi di gestione, il serbatoio potrebbe perdere la sua capacità entro 150 anni.

Lo studio conferma l'efficacia di SMART-SED come strumento per la previsione dell'interrimento e la pianificazione di strategie di mitigazione. Futuri sviluppi includono l'integrazione di moduli per frane e scenari climatici, allo scopo di garantire la resilienza delle infrastrutture idriche in un contesto di cambiamento climatico. All'interno di questo quadro complesso, SMART-SED si è dimostrato efficace nel catturare l'interazione tra processi naturali superficiali e funzionalità delle infrastrutture, ampliando la sua applicabilità in ambiti quali la protezione civile, la pianificazione del territorio e la gestione sostenibile delle risorse idriche.



# Mitigare la scarsità idrica futura: strategie ottimizzate per la gestione degli invasi in un clima che cambia

Mattia Neri<sup>1</sup>, Elena Toth<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Bologna, Italia, [mattia.neri5@unibo.it](mailto:mattia.neri5@unibo.it)

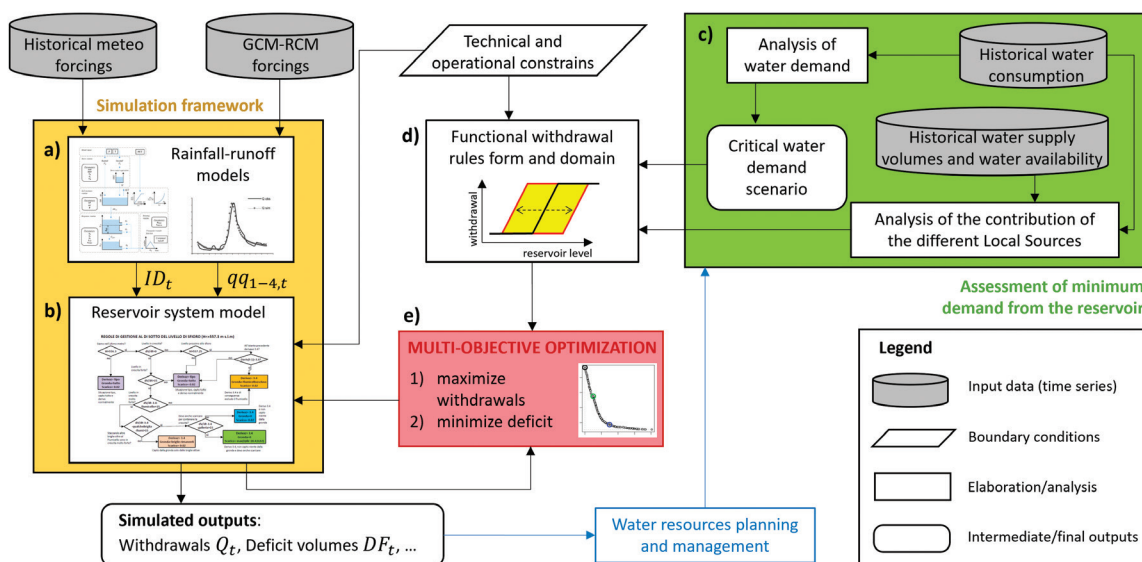


Figura 1 – Framework metodologico per l'ottimizzazione delle regole di derivazione dall'invaso.

L'impatto del cambiamento climatico sulla disponibilità idrica è una preoccupazione crescente per i gestori della risorsa. Per garantire la resilienza dei sistemi di approvvigionamento, è fondamentale adattare la gestione sostenibile e integrata delle diverse fonti alle variazioni in intensità e frequenza delle siccità idrologiche attese nel prossimo futuro. Tale sfida è particolarmente critica per i sistemi idropotabili, dove la risorsa richiede standard di qualità elevati e trattamenti complessi. Questo lavoro presenta un framework metodologico innovativo per la gestione ottimale degli invasi montani – fonti strategiche di acqua di alta qualità distribuita per gravità – in scenari di cambiamento climatico. L'approccio è stato implementato e testato con successo in Romagna, modellando il complesso sistema

multi-bacino dell'invaso di Ridracoli, che rappresenta la fonte principale e più sostenibile dell'area. La metodologia, schematizzata in Fig.1, si basa sull'ottimizzazione multi-obiettivo delle regole di prelievo, massimizzando la produzione idrica e garantendo al contempo il soddisfacimento della domanda, anche in condizioni di scarsità, sia sotto forzanti meteorologiche storiche che future.

Essa consente di quantificare le modifiche necessarie alle regole operative future, prevedendo i volu-

mi producibili e i potenziali deficit del sistema nel prossimo secolo.

La robustezza del metodo è garantita dalla ricostruzione storica delle operazioni della diga, fondamentale per il setup del modello; da una stima accurata dei fabbisogni regionali minimi, integrando il potenziale delle fonti alternative, e dall'utilizzo di un ampio set di modelli climatici.

I risultati offrono indicazioni strategiche di alto valore per i decisori, supportando una valutazione efficace del rischio di scarsità idrica futura e guidando la pianificazione a lungo termine delle risorse, con l'obiettivo di ridurre la pressione sulle fonti idriche meno sostenibili e più energivore. L'approccio può essere replicato in altre regioni, a condizione che siano disponibili i dati relativi alla domanda, i dati tecnici e i vincoli operativi dell'invaso.



# Alluvioni e incendi boschivi: analisi probabilistica del rischio di isolamento di piccoli centri abitati

Tatiana Ghizzoni<sup>1</sup>, Bruno Colavitto<sup>1</sup>, Eva Trasforini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CIMA Research Foundation, Savona, Italia, [tatiana.ghizzoni@cimafoundation.org](mailto:tatiana.ghizzoni@cimafoundation.org)

Una valutazione del rischio che integri pericolosità, esposizione e vulnerabilità, tenendo esplicitamente conto dell'incertezza all'interno di un quadro probabilistico, consente una stima più completa e realistica del rischio. A differenza degli approcci deterministici, la valutazione probabilistica del rischio considera sia gli eventi di danno ad alto impatto e bassa frequenza sia quelli di danno più frequenti ma meno intensi, permettendo una migliore comprensione anche degli scenari estremi.

Questo lavoro parte da un approccio probabilistico per valutare il rischio di isolamento dei piccoli centri abitati, causato da alluvioni e incendi boschivi che interrompono la rete stradale. Lo studio colma un vuoto nella letteratura, dove il tema dell'isolamento è stato finora affrontato prevalentemente mediante analisi deterministiche o analisi classiche di rete. Per garantire una valutazione scientificamente robusta, è stato sviluppato un insieme di scenari collettivamente esaustivi e mutuamente esclusivi. Il processo di generazione degli scenari si articola in due fasi principali: la definizione e selezione degli eventi, attraverso l'identificazione delle condizioni meteorologiche e idrologiche in grado di innescare alluvioni e incendi boschivi (ad esempio velocità del vento, umidità e portata fluviale) e la generazione probabilistica degli eventi, mediante approcci statistici multivariati in grado di preservare le correlazioni spaziali e le caratteristiche statistiche dei dati osservati. Per le alluvioni si adotta una metodologia consolidata e già testata in diversi paesi africani, mentre per gli incendi boschivi viene utilizzato un approccio basato sulle copule. I cataloghi di eventi così ottenuti rappresentano migliaia di anni di scenari potenziali. Per gli incendi è inoltre incluso un modello semplificato di innesco. La pericolosità in questo caso è valutata combinando i cataloghi di evento con mappe

di suscettibilità e informazioni sul combustibile derivate dall'uso del suolo; analogamente, gli eventi di piena sono integrati con le mappe di pericolosità da alluvione. Le perdite fisiche dirette alla rete stradale sono stimate per ciascun evento in termini di chilometri interessati, consentendo il calcolo di indicatori di rischio standard, quali la perdita media annua e quella massima probabile. Oltre ai danni diretti, viene analizzato l'impatto funzionale sulla rete stradale, infrastruttura critica per la mobilità di persone, merci e servizi. L'analisi considera l'identificazione delle aree potenzialmente isolate, la selezione dei centri di servizio (ospedali in questo specifico caso di studio), la determinazione dei percorsi ottimali origine-destinazione e la valutazione degli effetti della perdita di specifici tratti stradali sulla connettività complessiva. L'approccio, basato sui k-percorsi più brevi, è applicato al caso di studio della Regione Marche (Fig.1).

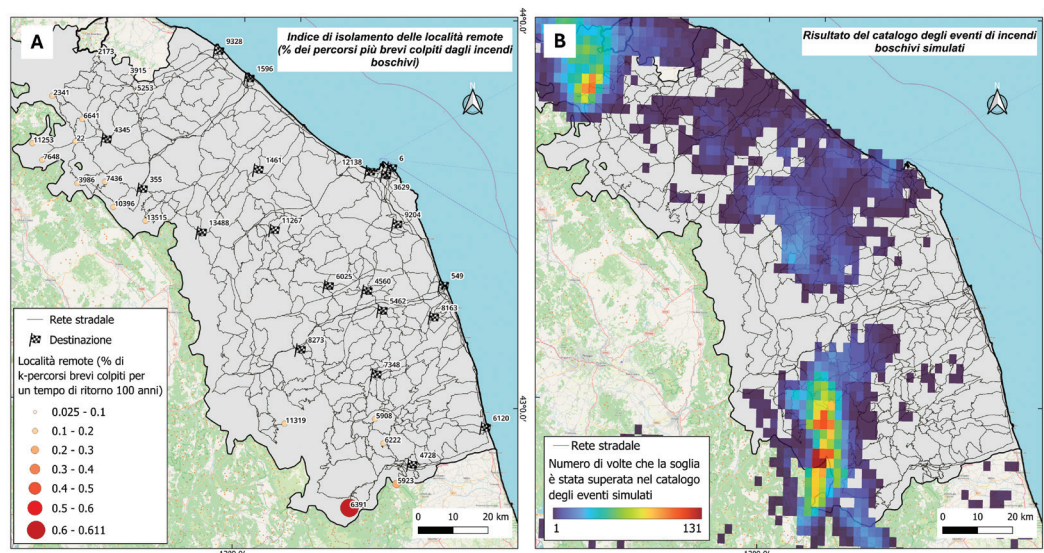


Figura 1. A) Impatto previsto (% di k-percorsi colpiti) per tempo di ritorno di 100 anni; si osserva un maggiore potenziale di isolamento a sud, dove si registra, in B), una maggiore frequenza di eventi di incendi simulati.



# Progetto FIRESTARTER: Visual AI per la resilienza al rischio incendi

Paola Allamano<sup>1</sup>, Alberto Bert<sup>1</sup>, Paolo Cavagnero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> WaterView srl, Torino, Italia, [alberto.bert@waterview.it](mailto:alberto.bert@waterview.it)

Il progetto FIRESTARTER (Bando RETURN, Spoke 6 TS2), condotto da WaterView Srl tra marzo e settembre 2025, ha sviluppato e validato una soluzione di Intelligenza Artificiale visiva (Visual AI) dedicata al monitoraggio ambientale e alla prevenzione del rischio incendi. L'obiettivo principale è stato l'implementazione di un sistema per l'analisi automatica di immagini acquisite da telecamere, finalizzato sia all'identificazione tempestiva di focolai (pennacchi di fumo e bagliori di fiamma) sia alla valutazione preventiva del rischio basata sullo stato della vegetazione. L'attività tecnico-scientifica è stata strutturata in due Work Packages (WP) principali:

1. Sviluppo Algoritmico (WP1): È stato costruito un dataset di addestramento diversificato per stagione e tipologia di vegetazione. Utilizzando architetture di reti neurali convoluzionali personalizzate, il dataset è stato utilizzato per perfezionare un modello già sviluppato da WaterView, in modo che fosse in grado di classificare semanticamente la scena e distinguere fenomeni di fumo reali da fattori di disturbo come nubi o riflessi. Il sistema integra, inoltre, una versione preliminare e spe-

perimentale di valutazione di un indice di rischio incendio derivante dalla combinazione dell'analisi visiva e della classificazione semantica della biomassa visibile nelle immagini analizzate.

2. Dimostrazione in campo (WP2): In collaborazione con la Regione Calabria e Inwit, sono stati allestiti due siti pilota nei comuni di Bonifatì e Lamezia Terme. Le telecamere e le unità di calcolo Edge AI installate sulle torri di telecomunicazione hanno permesso l'elaborazione locale delle immagini e la generazione di allarmi in tempo reale, inviati alla sala controllo regionale.

Durante la fase sperimentale (agosto-settembre 2025), il sistema ha confermato la propria robustezza identificando correttamente 34 episodi di fumo, con un'incidenza minima di falsi positivi (inferiore a 5 casi). Nonostante la riduzione della durata complessiva del progetto da nove a sette mesi, FIRESTARTER ha raggiunto integralmente i target previsti, ponendo le basi per l'adozione di un paradigma di monitoraggio intelligente, volto a proteggere infrastrutture critiche e territori vulnerabili ai cambiamenti climatici.



Figura 1 – Esempio di identificazione automatica di un pennacchio di fumo presso il sito pilota di Lamezia Terme tramite l'algoritmo di Visual AI sviluppato



# Analisi costi-benefici di sistemi di protezione passiva per ponti in condizioni di incendio

Donatella de Silva<sup>1</sup>, Andrea Miano<sup>2</sup>, Gabriella De Rosa<sup>1</sup>, Andrea Prota<sup>1</sup>, Emidio Nigro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli Federico II, Napoli, Italia, [donatella.desilva@unina.it](mailto:donatella.desilva@unina.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università Telematica Pegaso

La progettazione strutturale in caso di incendio si riferisce tradizionalmente ad approcci di tipo prescrittivo, ma negli ultimi decenni gli approcci prestazionali stanno ricevendo sempre più attenzione per le loro capacità di considerare incendi più realistici e quindi proporre soluzioni più economiche ed efficienti. In particolare, la ricerca si è concentrata su un approccio, innovativo per l'ambito sicurezza antincendio, combinato tra curve di fragilità in caso di incendio e analisi dei costi-benefici atti a valutare l'efficienza del sistema di protezione passivo al variare del suo spessore. La metodologia proposta si basa su cinque step: dopo aver selezionato la tipologia strutturale e definito i livelli di prestazione richiesti (PL), vengono identificati scenari di incendio realistici ed effettuate le analisi termiche. Successivamente, i risultati termici sono applicati al modello globale o alla sottostruttura, in modo da eseguire le analisi termo-meccaniche avanzate per valutare la risposta strutturale in caso di incendio. La terza fase prevede la costruzione delle curve di fragilità al fuoco, basate sui rapporti domanda-capacità (DCR) ricavati dalle simulazioni. Si procede poi con l'analisi dei costi attraverso la valutazione dei costi diretti e indiretti basata sulle curve di fragilità ottenute. Infine, attraverso l'analisi costi-benefici si stabilisce la migliore soluzione considerando sia la performance strutturale che i costi al variare dello spessore di protettivo.

La metodologia è stata applicata ad un caso tipologico di viadotto in struttura composta acciaio-calcestruzzo, di luce 30 m e altezza circa 8 m dall'intradosso del terreno, formato da due travi principali, cinque travesi e soletta in ca. La soletta di 25 cm è in calcestruzzo C32/40 e barre d'armatura B450C. Le travi principali ed i traversi invece sono di acciaio S355.

I carichi sull'impalcato sono stati calcolati in accordo con l'Eurocodice ed il Codice di Prevenzione incendi italiano. Le proprietà termiche dei materiali sono definite in accordo con gli Eurocodici.

Gli scenari di incendio analizzati riguardano veicoli singoli e multipli, per i quali sono stati utilizzate curve di rilascio termiche (RHR) ricavate dalla letteratura, posizionando i veicoli sotto la mezzera dell'impalcato per massimizzare gli effetti. Le analisi termo-meccaniche sono state eseguite utilizzando il software SAFIR ed i risultati sono stati analizzati considerando il rapporto domanda capacità in funzione dello spostamento massimo del ponte in mezzera. Sono state poi svolte le stesse analisi considerando la struttura protetta, con spessore di protettivo variabile (1cm, 1.4 cm, 2 cm e 3cm), utilizzando valori di conducibilità termica di letteratura.

Le curve di fragilità sono state ricavate attraverso una *cloud analysis* per due livelli di prestazioni, PL III e PL IV, in funzione dei DCR ricavati e di due intensità di misura, il picco della curva RHR e il carico di incendio. A valle delle curve di fragilità è stata condotta un'analisi economica, basata sui costi iniziali di manutenzione, del protettivo e della manodopera. In aggiunta sono stati considerati, in funzione della probabilità di eccedere un determinato livello di prestazione, i costi diretti e indiretti a seguito dell'incendio.

L'analisi costi benefici ha consentito di quantificare l'efficacia delle diverse soluzioni di protezione passiva, superando una valutazione basata meramente sulle prestazioni strutturali. Tale approccio risulta un utile strumento di supporto alle scelte progettuali, permettendo di individuare la configurazione ottimale dello spessore di protettivo, sia in termini economici che di performance all'incendio.





# Sviluppo di un sistema di supporto alle decisioni per gli incendi boschivi: applicazione al caso di studio della Calabria

Davide Berardi<sup>1</sup>, Marta Galuppi<sup>1</sup>, Alessio De Angelis<sup>1</sup>, Angelo Libertà<sup>1</sup>, Mara Lombardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali Ambiente, Sapienza, Università di Roma, Roma, Italia, [davide.berardi@uniroma1.it](mailto:davide.berardi@uniroma1.it)

Il progetto, sviluppato nell'ambito delle attività del Proof of Concept (PoC) Calabria di RETURN, ha come obiettivo la definizione di un modello di Decision Support System (DSS) per l'analisi, la gestione e la mitigazione del rischio da incendi boschivi. In una prospettiva di resilienza territoriale, la necessità di garantire la continuità di servizio delle infrastrutture critiche rende prioritario disporre di strumenti quantitativi in grado di identificare le aree maggiormente esposte al rischio, orientare le strategie di prevenzione e supportare un'allocazione efficiente delle risorse disponibili. In tale contesto, il lavoro sviluppa una modellazione applicata al caso di studio della Regione Calabria, caratterizzata da condizioni climatiche e morfologiche tipiche dell'ambiente mediterraneo, nonché da una marcata interazione tra ambienti boschivi e contesti antropizzati. L'impostazione metodologica integra dati storici sugli incendi con variabili territoriali derivate da analisi GIS, al fine di stimare, mediante modellazione geostatistica, la distribuzione spaziale degli inneschi e di analizzarne la relazione con i principali fattori predisponenti, prestando particolare attenzione agli elementi riconducibili alle infrastrutture.

In primo luogo, viene sviluppata una procedura per la ricostruzione dei punti di innesco degli incendi a partire dai perimetri delle aree percorse dal fuoco. Le stime degli inneschi sono successivamente associate alle classi di uso e copertura del suolo e messe in relazione con la prossimità di infrastrutture lineari e aree urbanizzate — quali la rete stradale, la sentieristica, i margini urbani e la linea ferroviaria — mediante una modellazione geostatistica. Tale approccio consente di derivare la distribuzione della distanza minima dei punti di innesco rispetto alle infrastrutture, con particolare riferimento a quelle viarie e ferroviarie. Sulla base dei risultati della modellazione, viene quindi proposto un modello probabilistico integrato

nel DSS e finalizzato all'identificazione di corridoi infrastrutturali e porzioni di territorio prioritari per la gestione dell'emergenza. L'approccio è orientato a garantire la continuità di servizio delle infrastrutture critiche, preservare la vegetazione esistente e ottimizzare l'efficacia degli interventi di mitigazione.

Una rappresentazione dei principali risultati del progetto è riportata in Fig. 1, che sintetizza l'output della modellazione mediante una mappa di probabilità di innesco discretizzata in classi. La distribuzione spaziale evidenzia una marcata concentrazione delle classi di probabilità più elevata lungo specifici corridoi infrastrutturali e in prossimità della linea ferroviaria, mentre le classi a probabilità inferiore risultano prevalentemente diffuse nelle aree meno accessibili e maggiormente interne. Tale configurazione risulta coerente con l'ipotesi di un ruolo determinante dei fattori di accessibilità e della pressione antropica nella localizzazione dei punti di innesco degli incendi.

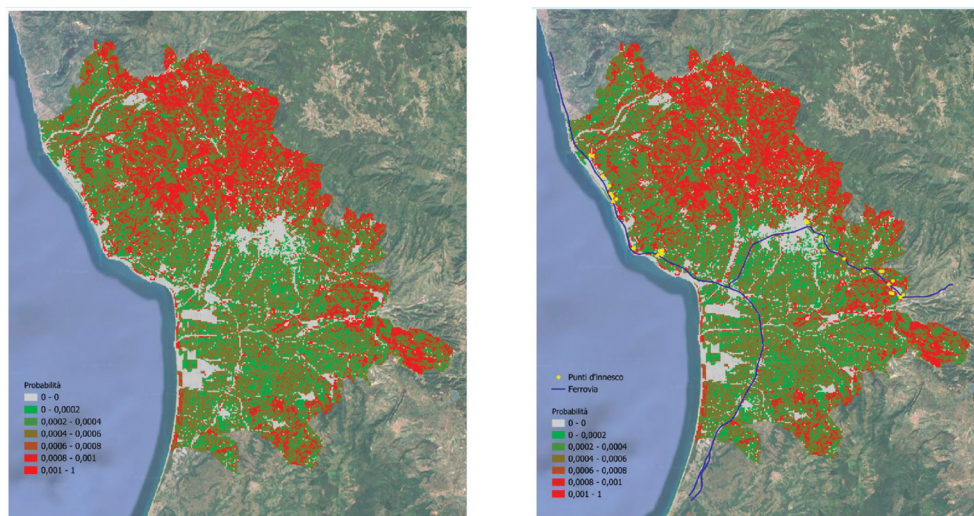


Figura 1 - Mappa



# Valutazione del trasporto solido nel torrente Maddalena mediante il modello SMART-SED

Monica Corti<sup>1</sup>, Matteo Antelmi<sup>1</sup>, Camilla Crippa<sup>1</sup>, Monica Papini<sup>1</sup>, Laura Longoni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Politecnico di Milano, Milano, Italia, [matteo.antelmi@polimi.it](mailto:matteo.antelmi@polimi.it)

L'erosione e il trasporto dei sedimenti, in particolare durante eventi di pioggia estrema, rappresentano una minaccia significativa per la sicurezza delle persone e per la funzionalità delle infrastrutture critiche. L'aumento di tali fenomeni, legato ai cambiamenti climatici e alla variabilità dei regimi pluviometrici, accresce la vulnerabilità delle aree a valle, incluse opere idrauliche, ponti e centri urbani. In questo contesto, emerge la necessità di strumenti affidabili, adattabili ed efficienti per valutare i rischi connessi ai sedimenti e supportare la gestione sostenibile delle risorse.

Per rispondere a queste sfide, il Politecnico di Milano ha sviluppato SMART-SED, un modello numerico fisicamente basato e spazialmente distribuito, progettato per simulare processi superficiali quali deflusso, erosione e trasporto solido alla scala di bacino. Il modello richiede input minimi, spesso reperibili da dataset open source, e utilizza schemi numerici robusti per garantire la conservazione della massa e catturare le dinamiche idrologiche e sedimentarie transitorie. SMART-SED è stato validato in bacini con caratteristiche geologiche e morfologiche differenti, dimostrando flessibilità e affidabilità. Nel presente studio, il modello è applicato al bacino del torrente Maddalena, situato nel

Comune di Fuscaldo (Provincia di Cosenza). Lo studio si sviluppa in un contesto critico per la valutazione dei rischi idrogeologici legati all'erosione e al trasporto solido, soprattutto in prossimità di infrastrutture strategiche, come ponti e un impianto di depurazione sito nei pressi dell'abitato. Nello specifico, sono stati analizzati tre differenti scenari corrispondenti a condizioni di pioggia massima, minima e media valutati per gli ultimi venti anni, e un evento orario estremo con tempo di ritorno di 200 anni. I risultati evidenziano una forte sensibilità del bacino alla variabilità pluviometrica: le portate liquide variano da 6,5 a 18 m<sup>3</sup>/s negli scenari storici, raggiungendo 240 m<sup>3</sup>/s nell'evento estremo, mentre i volumi di sedimenti oscillano tra 419 e 1056 m<sup>3</sup>. Sebbene i volumi mobilizzati nell'evento estremo siano modesti, il progressivo accumulo in prossimità del ponte potrebbe ridurre la sezione utile, con rischio di interruzione del traffico.

Anche se per questo caso non sono presenti dati utili per la calibrazione dell'erosione, i risultati appaiono verosimili se confrontati con quelli ottenuti per bacini idrografici di dimensioni paragonabili. Lo studio conferma pertanto l'efficacia di SMART-SED come strumento per la pianificazione e la mitigazione dei rischi legati agli eventi meteorologici estremi.





# Pericolosità idraulica multi-scenario in piccoli bacini ripidi e impatti su infrastrutture critiche da processi frana-piena concatenati

Margherita Lombardo<sup>1</sup>, Pierfranco Costabile<sup>1</sup>, Carmelina Costanzo<sup>1</sup>, Lisa Borgatti<sup>2</sup>, Giacomo Titti<sup>2</sup>, Giulia Evangelista<sup>3</sup>, Pierluigi Claps<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, Università della Calabria, Cosenza, Italia, [margherita.lombardo@unical.it](mailto:margherita.lombardo@unical.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Bologna, Italia

<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia

I bacini mediterranei a forte pendenza presentano risposte idrologiche rapide e sono particolarmente esposti a fenomeni di pericolosità concatenata, soprattutto in presenza di infrastrutture critiche localizzate in prossimità di versanti instabili e di alvei incisi e confinati. In questo contesto si colloca il presente studio, dedicato al torrente Maddalena (12 km<sup>2</sup>), situato nel territorio di Fuscaldo (Italia meridionale) e caratterizzato da marcata incisione dell'alveo, pendii ripidi, nonché dalla presenza di un impianto di depurazione e sottoservizi in prossimità di un attraversamento stradale. Recenti sopralluoghi hanno messo in evidenza condizioni di instabilità di versante e la presenza di elementi vulnerabili, con potenziali implicazioni sia in termini di esposizione agli eventi di piena sia di rischio sanitario.

Per analizzare tali criticità è stato sviluppato un modello idrologico-idraulico bidimensionale *Rain-on-Grid* ad alta risoluzione, di tipo *event-based*, finalizzato alla simulazione dello scenario di piena, conseguente ad una pioggia di progetto con tempo di ritorno pari a 200 anni. Le perdite per infiltrazione sono state stimate mediante il metodo SCS-Curve Number. È stata inoltre condotta un'analisi di sensibilità variando i coefficienti di scabrezza di Manning e adottando, in alternativa,

l'approccio di infiltrazione Green-Ampt. Sono stati considerati tre scenari: uno di sola piena e due combinati frana-piena, nei quali la deposizione del volume di sedimenti mobilizzabile dai versanti instabili è stata rappresentata mediante colmamento uniforme della sezione oppure ostruzione localizzata dell'alveo.

I risultati indicano che, nello scenario di sola piena, l'allagamento rimane confinato all'alveo e alle aree ripariali, senza interessare direttamente l'impianto di depurazione, con portate di picco comprese tra 68 e 115 m<sup>3</sup>/s. Al contrario, negli scenari combinati la riduzione della sezione utile al deflusso determina marcati effetti di rigurgito a monte del ponte e la deviazione della corrente verso l'area golenale localizzata in destra idrografica, con tiranti fino a circa 0,7 m e velocità superiori a 1 m/s in corrispondenza dell'impianto. Le condizioni idrauliche risultanti sono associate a livelli di pericolosità incompatibili con l'accessibilità pedonale e veicolare.

Nel complesso, lo studio mostra come la sola analisi di piena possa non essere sufficiente a descrivere il rischio in bacini mediterranei ripidi e sottolinea l'importanza di approcci multi-scenario per una valutazione integrata della pericolosità e per la definizione di strategie di mitigazione mirate a tutela delle infrastrutture critiche.





# Stima della suscettibilità e intensità da frana in Calabria

Giacomo Titti<sup>1</sup>, Matteo Antelmi<sup>2</sup>, Laura Longoni<sup>2</sup>, Lisa Borgatti<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, ALMA MATER STUDIORUM Università di Bologna, Bologna, Italia,

[giacomo.titti@unibo.it](mailto:giacomo.titti@unibo.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Milano, Italia

La valutazione della suscettibilità da frana è l'approccio più comune per stimare quanto un paesaggio sia predisposto all'innescio di frane. Numerosi metodi e approcci, sia qualitativi sia quantitativi, sono stati proposti e testati in letteratura per tale valutazione. Partendo dal presupposto che "il passato è la chiave del futuro", il modello apprende come distinguere la presenza dall'assenza di una frana sulla base di un insieme di fattori predisponenti (ad es. pendenza, curvatura, esposizione, geologia).

Le prestazioni dei modelli sono notevolmente migliorate nell'ultimo decennio, in particolare con l'emergere di modelli basati sull'intelligenza artificiale. Purtroppo, solo alcuni di questi, definiti explainable AI, consentono all'utente di comprendere pienamente il risultato. Pertanto, in questo lavoro si è preferito utilizzare un modello statistico completamente interpretabile, il Generalized Additive Model (GAM), per eseguire non solo un'analisi di suscettibilità da frana, ma anche una stima dell'intensità della frana espressa come estensione dell'area in frana.

L'analisi è stata condotta nella regione Calabria nell'ambito del Proof of Concept 1 dello Spoke TS2, focalizzato sulle interazioni tra pericoli naturali e infrastrutture lineari. Considerando il contesto progettuale e studi precedenti, l'analisi si è concentrata su frane complesse e rotazionali/traslazionali individuate nell'inventario IFFI. In totale sono state considerate nell'analisi 8067 frane distribuite in 2512 Slope Units (SUs) su un totale di 17106 SUs.

I modelli sono stati calibrati utilizzando variabili morfologiche, climatiche, ambientali e geologiche. I risultati mostrano valori elevati di suscettibilità e intensità lungo la costa tirrenica. Sebbene le metriche globali indichino buone prestazioni del modello di suscettibilità, la percentuale di unità di mappa instabili, predette correttamente dal modello, è ridotta.

In aggiunta a questo, le prestazioni complessivamente modeste, soprattutto per il modello di intensità, evidenziano come la qualità e l'omogeneità dell'inventario di frana rappresentino il principale fattore limitante dell'analisi.



# Zonazione nazionale dell'esposizione della rete stradale a fenomeni geo-idrologici rapidi

Massimiliano Alvioli<sup>1</sup>, Federica Fiorucci<sup>1</sup>, Giuseppe Esposito<sup>1</sup>, Ivan Marchesini<sup>1</sup>

Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Perugia, [massimiliano.alvioli@irpi.cnr.it](mailto:massimiliano.alvioli@irpi.cnr.it)

La valutazione omogenea dell'esposizione delle infrastrutture lineari a fenomeni geo idrologici rapidi costituisce un requisito tecnico essenziale per la gestione del rischio, la pianificazione della manutenzione e la definizione di priorità d'intervento su reti estese. In questo contributo si presenta un impianto metodologico integrato, applicato a scala nazionale alla rete stradale gestita da ANAS, finalizzato alla zonazione dell'esposizione a tre classi di processi a risposta veloce, flash flood, debris flow e rockfall, mediante procedure riproducibili e restituzioni cartografiche in ambiente GIS. Per la componente idrologica è stata realizzata la delimitazione sistematica dei bacini e sottobacini con recapito verso la sede stradale, a partire da un modello digitale del terreno e dall'intersezione tra reticolo idrografico e infrastruttura. Per ciascuna unità di drenaggio sono stati derivati descrittori geomorfometrici e stimato il tempo di corrvazione come indicatore della scala temporale di risposta del bacino, particolarmente informativo per l'innesco e la propagazione di flash flood in bacini di piccola e media estensione. Il calcolo è stato effettuato in modalità automatizzata applicando, in modo coerente sull'intero territorio nazionale, più formulazioni empiriche selezionate in funzione della taglia del bacino. Per la componente gravitativa sono state sviluppate procedure di zonazione dell'ingombro da debris flow e

rockfall in prossimità della rete stradale. Le debris flow sono state trattate distinguendo processi su versante e processi canalizzati, mediante l'identificazione di aree sorgenti e la simulazione della propagazione con modelli concettuali in grado di rappresentare la traiettoria di run-out e la distribuzione spaziale del possibile ingombro. Le cadute massi sono state analizzate mediante modellazione fisicamente basata tridimensionale delle traiettorie, a partire da aree potenziali di distacco derivate da criteri morfometrici e parametrizzazione territoriale. In entrambi i casi, i risultati raster di modellazione sono stati trasferiti sul grafo infrastrutturale tramite segmentazione della rete in tratti omogenei e calcolo di indicatori sintetici lungo ciascun segmento, successivamente classificati in classi di esposizione.

L'integrazione delle tre linee di analisi consente una zonazione multirischio coerente, che combina unità di drenaggio e tempi caratteristici per la componente flash flood con classi di esposizione a segmenti, per debris flow e rockfall. I prodotti ottenuti sono concepiti per supportare attività di screening a scala nazionale, l'individuazione di hot-spot, la prioritizzazione di verifiche di dettaglio e l'implementazione di procedure di gestione in tempo reale o in fase di allerta, con un livello di standardizzazione idoneo al trasferimento verso enti gestori.

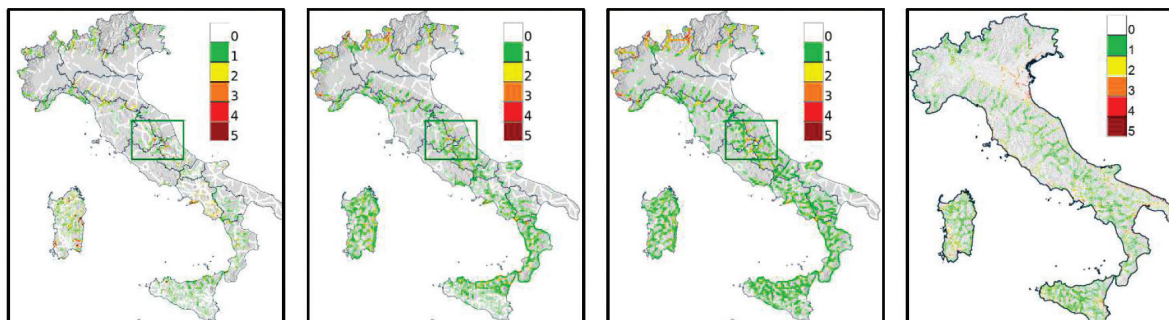


Figura 1. Zonazione della rete stradale ANAS con classi di impatto per crolli in roccia (a), debris flow sul versante (b) e canalizzati (c), e per flash floods (c).



# Frane superficiali e colate detritiche: analisi, modellazione e impatti sulle infrastrutture

Francesco Castelli<sup>1</sup>, Campisi Tiziana<sup>1</sup>, Gabriele Freni<sup>1</sup>, Valentina Lentini<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Enna "Kore", Enna, Italia, [francesco.castelli@unikore.it](mailto:francesco.castelli@unikore.it)

Le frane superficiali e le colate detritiche, spesso indotte da intense precipitazioni atmosferiche, rappresentano una delle principali criticità geo-idrologiche nelle regioni mediterranee, in particolare nell'Italia meridionale. L'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi estremi, associato al cambiamento climatico, ha incrementato la possibilità di innesco di fenomeni franosi rapidi, caratterizzati da elevata velocità, breve tempo di preavviso e notevole capacità distruttiva. Questi risultano particolarmente pericolosi per le infrastrutture di trasporto, spesso localizzate lungo versanti instabili o in contesti morfologicamente complessi. Gli studi condotti propongono un approccio integrato alla valutazione della pericolosità e del rischio, basato sulla combinazione di analisi geologiche, geomorfologiche e geotecniche, sperimentazione di laboratorio, modellazione numerica e strumenti avanzati di gestione dei dati. I casi studio della Sicilia centrale e nord-orientale (Enna e Gioiosa Marea) evidenziano come eventi di pioggia intensa e concentrata nel tempo possano determinare la rapida transizione da condizioni di stabilità a una situazione di collasso, in particolare nei ter-

reni parzialmente saturi, dove la riduzione della suzione matriciale comporta una significativa perdita di resistenza al taglio. In questo contesto, un contributo rilevante è fornito dalla modellazione fisica in scala di laboratorio (Fig.1), che consente di riprodurre l'innesco delle frane superficiali e la successiva evoluzione in colate detritiche. Le prove sperimentali hanno permesso di analizzare i meccanismi di propagazione e le aree di deposito. Il confronto con le formulazioni teoriche classiche ha mostrato la necessità di superare l'ipotesi di concentrazione costante, introducendo modelli più realistici per una corretta simulazione del fenomeno.

Le analisi sviluppate affrontano il tema della vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto attraverso metodologie di analisi del rischio semi-quantitative e quantitative, nonché mediante l'integrazione di strumenti digitali avanzati come il BIM applicato all'Ingegneria Geotecnica. L'impiego di modelli informativi del sottosuolo e delle infrastrutture consente una gestione più efficace dei dati, favorendo processi decisionali orientati alla prevenzione ed al miglioramento della resilienza infrastrutturale.



Figura 1 - Prototipo canaletta per la simulazione di colate detritiche.





# Gestione del rischio da caduta massi: il contributo della linea guida UX131 alle infrastrutture stradali italiane

---

Maddalena Marchelli<sup>1</sup>, Valerio De Biagi<sup>1</sup>, Bernardino Chiaia<sup>1</sup>, Daniele Peila<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Politecnico di Torino, Torino, Italia, [maddalena.marchelli@polito.it](mailto:maddalena.marchelli@polito.it)

---

La caduta massi rappresenta un pericolo naturale significativo per le infrastrutture viarie, in particolare lungo le reti stradali in aree montane e costiere. Le barriere paramassi a rete costituiscono la principale misura di mitigazione del rischio. Queste sono progettate per intercettare i blocchi e dissiparne l'energia cinetica, con capacità di assorbimento fino a circa 12.000 kJ. Tuttavia, la loro efficacia nel tempo è compromessa da degrado, invecchiamento e condizioni ambientali, di conseguenza si rende necessaria una gestione sistematica. In questo quadro, la linea guida "UX131: Metodologia per la gestione delle barriere paramassi a rete esistenti attraverso l'individuazione di classi di attenzione in funzione del rischio" (Versione 2, 10/07/2025), emanata da UNICMI, introduce un approccio sistematico per la valutazione e la manutenzione delle opere esistenti. Il documento, sviluppato con il contributo di enti pubblici e privati, produttori, professionisti e il supporto scientifico del Politecnico di Torino, definisce una procedura multilivello basata su inventario, ispezione visiva, classificazione del danno e analisi del rischio.

Elemento centrale è l'assegnazione della Classe di Attenzione (CdA), derivata dalla combinazione di tre

fattori: pericolosità del versante, perdita di efficienza della barriera e livello di esposizione dell'infrastruttura protetta. La valutazione della mancanza di efficienza si fonda su parametri qualitativi e semi-quantitativi, considerando gravità e diffusività dei difetti, nonché l'importanza strutturale dei componenti danneggiati. Il metodo consente di distinguere situazioni critiche, garantendo priorità agli interventi urgenti e ottimizzando le risorse disponibili. Le CdA sono articolate in quattro livelli (bassa, medio-bassa, medio-alta e alta) e forniscono una base operativa per pianificare manutenzioni, verifiche approfondite e, se necessario, sostituzioni o upgrade.

L'adozione della UX131 consente di passare da una manutenzione reattiva a una gestione proattiva basata sul rischio, standardizzando i criteri di ispezione e garantendo uniformità tra territori e tecnologie. Tale approccio incrementa la resilienza delle infrastrutture viarie italiane, assicurando trasparenza e comparabilità nella gestione delle opere di protezione contro la caduta massi. La metodologia è stata già testata in contesti alpini, confermando la sua efficacia nell'individuare difetti critici e nel definire priorità di intervento per migliorare la sicurezza stradale.





# Caratterizzazione sperimentale e modellistica delle perdite in condotte in pressione: analisi delle relazioni pressione-portata per diverse tipologie di rottura

Stefania Piazza<sup>1</sup>, Gabriele Freni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Enna "Kore", Enna, Italia, [stefania.piazza@unikore.it](mailto:stefania.piazza@unikore.it)

Il lavoro presenta un'approfondita analisi sperimentale e modellistica delle perdite idriche in condotte in pressione, condotta sulla rete di laboratorio dell'Università di Enna "Kore".

L'obiettivo principale è definire, con elevata robustezza scientifica, le relazioni tra pressione e portata di efflusso per diverse tipologie di rotture, al fine di migliorare la rappresentazione dei fenomeni di leakage nei modelli numerici e supportare strategie avanzate di monitoraggio delle perdite nelle reti reali.

Le attività sperimentali hanno riguardato tre classi di rottura: fessure longitudinali, fessure trasversali e fori circolari, realizzate su tubazioni in HDPE PN16 (diametro interno 51,4 mm).

Per ciascuna tipologia sono stati preparati tronchetti con dimensioni variabili, così da investigare l'effetto della geometria della perdita sul comportamento idraulico.

Le prove, eseguite in condizioni stazionarie di pressione compresa tra 1 e 5.5 bar, hanno previsto la misura contemporanea di portata e pressione a monte e a valle della perdita tramite flussometri e trasduttori piezoresistivi ad alta precisione. I dati raccolti mostrano in tutti i casi un andamento curvilineo delle relazioni pressione-portata, compatibile con il comportamento non lineare tipico delle perdite in condotte pressurizzate.

Le curve sperimentali sono state confrontate con tre modelli di riferimento: la legge di Torricelli, la formulazione di Cassa et al. (2010) e la legge di potenza proposta dalla IWA Water Loss Task Force (con eventuale variante per i fori circolari). Dalle prove emerge che:

- per le fessure longitudinali, l'area efficace della perdita cresce sensibilmente con il carico idraulico; per le aperture maggiori, l'esponente di perdita si discosta dal valore teorico di 0,5 e raggiunge valori fino a 0,9, evidenziando il ruolo delle deformazioni elastiche del materiale;
- per le fessure trasversali, le deformazioni sono trascurabili: l'area della perdita rimane pressoché costante e tutte le formulazioni riproducono correttamente i dati sperimentali;
- per i fori circolari, solo per i diametri molto piccoli si nota una lieve dipendenza dell'area efficace dalla pressione, mentre per dimensioni crescenti l'efflusso segue leggi di potenza stabili con esponente vicino a 0,5.

Sono state inoltre condotte prove aggiuntive inserendo il tronchetto di perdita in materiali di ricoprimento (sabbia mono granulare e sabbia marina) per simulare condizioni realistiche di interrimento. Il terreno introduce una resistenza che riduce la portata di efflusso, pur mantenendo la forma caratteristica delle curve pressione-portata. Ciò indica che, sebbene l'ambiente circostante alteri l'intensità della perdita, non modifica la natura del fenomeno né le leggi descrittive più idonee.

Il lavoro fornisce una base sperimentale solida per la calibrazione dei modelli di perdita, confermando la validità delle leggi di potenza nella rappresentazione dei fenomeni di leakage e chiarendo il ruolo della deformabilità delle tubazioni in HDPE. I risultati costituiscono un contributo rilevante per il miglioramento dei modelli di rete, lo sviluppo di algoritmi di leak detection e la progettazione di sistemi di controllo della pressione nelle reti idropotabili.





# Modellazione predittiva delle perdite d'acqua reali nelle reti di distribuzione idrica utilizzando l'algoritmo Random Forest

Stefania Piazza<sup>1</sup>, Gabriele Freni<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Enna "Kore", Enna, Italia, [stefania.piazza@unikore.it](mailto:stefania.piazza@unikore.it)

La riduzione delle perdite idriche nelle reti di distribuzione rappresenta una delle principali sfide per i gestori del servizio idrico, in un contesto caratterizzato da crescente attenzione alla sostenibilità, all'efficienza energetica e agli standard di qualità regolati da ARERA. In tale ambito, gli indicatori M1b, M2 e M3 costituiscono strumenti fondamentali per valutare le prestazioni delle reti e pianificare gli interventi di rinnovo infrastrutturale. Tuttavia, la localizzazione tempestiva e affidabile delle perdite rimane un obiettivo complesso, soprattutto quando la rete è caratterizzata da una disponibilità limitata di dati di misura e da condizioni operative variabili. Il presente lavoro propone una metodologia ibrida per la rilevazione delle perdite in reti di distribuzione idrica che combina modellazione idraulica, basata sulla fisica e tecniche di Machine Learning, con l'obiettivo di sviluppare strumenti di supporto alle strategie di asset management, orientate alla sostituzione "intelligente" dei tratti più critici della rete. La procedura integra dati sperimentali e dati sintetici, generati tramite un modello idraulico calibrato, sviluppato mediante EPANET Matlab Toolkit, che riproduce accuratamente il comportamento del sistema in presenza di differenti tipologie di perdita e condizioni di pressione.

Le attività sperimentali sono state condotte sulla rete di laboratorio dell'Università di Enna "Kore", costituita da un circuito ad anello in tubazioni HDPE dotato di strumentazione ad alta precisione per la misura in tempo reale di pressione e portata. Diverse configurazioni di perdita sono state introdotte nelle condotte, simulando scenari realistici quali fenditure longitudinali e trasversali e fori circolari di dimensioni variabili. A partire dai dati raccolti, arricchiti da serie di dati sintetici ottenuti

variando i coefficienti di scarico e introducendo rumore di misura controllato, è stato addestrato un classificatore Random Forest finalizzato a distinguere tra condizioni di esercizio normali e condizioni di presenza di perdita.

I risultati mostrano che l'approccio proposto raggiunge livelli di accuratezza superiori al 90% nella classificazione degli scenari di perdita, evidenziando la capacità del modello di apprendere le anomalie idrauliche associate ai diversi regimi operativi. L'analisi delle prestazioni rivela inoltre come la pressione operativa influenzi la riconoscibilità delle perdite: pressioni più elevate determinano anomalie più marcate, ma il modello mantiene prestazioni elevate anche in condizioni di bassa pressione, grazie alla combinazione informativa dei segnali di portata e pressione. L'utilizzo congiunto di dati reali e sintetici risulta strategico nel migliorare la robustezza e la generalizzazione del modello, mitigando problemi di over fitting e ampliando la gamma di scenari riconoscibili.

Le evidenze sperimentali confermano che l'integrazione di modelli fisici e strumenti di intelligenza artificiale costituisce una soluzione efficace per il monitoraggio automatico delle reti idriche e per la riduzione delle perdite, anche in contesti caratterizzati da limitata copertura sensoriale. La metodologia proposta si configura come un valido supporto alle decisioni per la gestione patrimoniale delle reti, in linea con gli obblighi regolatori e di riduzione delle perdite fissati da ARERA. Sviluppi futuri prevedono la sperimentazione su reti di servizio reali e l'integrazione di sistemi di misura avanzati, per incrementare ulteriormente l'accuratezza e la scalabilità del modello.



# MIADIGITACQUE - Modellizzazione Idraulica Avanzata e servizi idrici DIGITali per la gestione predittiva degli ACQUEdotti

Orazio Giustolisi<sup>1</sup>, Daniele Biagio Laucelli<sup>2</sup>, Luigi Berardi<sup>3</sup>, Antonietta Simone<sup>4</sup>

1,4 IDEA Research Transfer S.r.l., Bari, Italia, [orazio.giustolisi@poliba.it](mailto:orazio.giustolisi@poliba.it)

2, 3 Informhydro S.r.l., Pescara, Italia

MIADIGITACQUE, sviluppato nel programma RETURN, introduce metodologie e strumenti per la transizione digitale del servizio idrico, allo scopo di aumentare la resilienza e supportare i gestori nella gestione delle reti. Cardine dell'approccio è il gemello fenomenologico integrato con modellazione idraulica avanzata e Servizi Idrici Digitali, app di ingegneria che trasformano dati grezzi in informazioni operative (Figura 1). Test su reti reali mostrano che l'integrazione di dati, modelli e algoritmi può guidare decisioni più efficienti e sostenibili.

*Valorizzazione dei dati e modellazione.* Metodologia per integrare dati eterogenei (GIS, EPANET, monitoraggi) nella piattaforma WDNNetGIS-XL, con interoperabilità GIS e modelli geometrici consolidati. Sono stati sviluppati servizi per analisi topologiche e affidabilità del sistema di valvole di isolamento, basati sulla teoria delle reti complesse, a supporto della continuità del servizio.

*Calibrazione e perdite.* Il nuovo approccio alla calibrazione, che integra FAVAD e POWER, introduce due indicatori: AMSI, per pianificare gli interventi di asset management, e MN, che correla deterioramento e deformabilità dei materiali. Questi strumenti consentono di ottimizzare la calibrazione e orientare interventi mirati come la ricerca perdite e la sostituzione delle condotte.

*Strategia digitale per asset management e qualità dell'acqua.* Il framework modellistico, innovativo nella valutazione dell'impatto delle azioni di asset management sulla qualità tramite un modello a cinetiche di se-

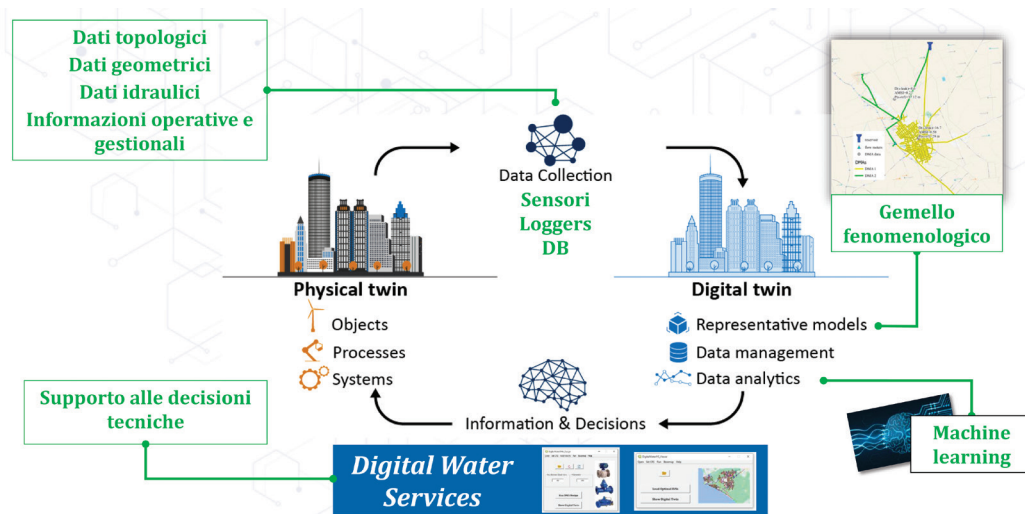


Figura 1 - Schema dell'approccio metodologico applicato in MIADIGITACQUE

condo ordine, considera reazioni in bulk water e pipe wall, stimando il consumo di disinfettante e la sicurezza sanitaria. Sono stati definiti indicatori per quantificare gli effetti delle sostituzioni sulla disinfezione, fornendo ai gestori strumenti operativi per garantire la conformità alla Direttiva UE 2184/2020.

Il progetto ha consolidato un ecosistema digitale che integra gemello digitale e fenomenologico, Servizi Idrici Digitali per affidabilità, sostituzioni, manutenzione predittiva e indicatori innovativi per decisioni strategiche.

Questa visione contribuisce alla riduzione delle perdite idriche, alla conservazione della risorsa e alla diminuzione della carbon footprint associata al servizio idrico, favorendo la transizione verde e digitale.



# Un approccio metodologico per la manutenzione predittiva nelle reti di distribuzione idrica urbane

Franco Cicirelli<sup>1</sup>, Maria Antonietta Panza<sup>1</sup>, Andrea Vinci<sup>1</sup>, Antonio Guerrieri<sup>1</sup>, Qimeng Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ICAR-CNR, Rende, Italia, [f.cicirelli@icar.cnr.it](mailto:f.cicirelli@icar.cnr.it)

Il presente contributo affronta la sfida della manutenzione predittiva delle reti urbane di distribuzione idrica, un'attività essenziale per prevenire lo spreco d'acqua, tutelare l'ambiente e garantire la continuità del servizio ai cittadini. L'obiettivo perseguito è duplice: da un lato si vuole definire un quadro metodologico e un'architettura software a supporto della progettazione e dello sviluppo di applicazioni generali per la manutenzione predittiva delle reti idriche urbane; dall'altro si punta all'individuazione precoce di fenomeni di degrado strutturale o di danneggiamento.

L'architettura impiega sistemi di sensing basati sull'*Internet of Things*, strumenti di previsione guidati dall'*Intelligenza Artificiale* (IA) e il paradigma del *continuum Edge/Cloud* per bilanciare efficienza computazionale, scalabilità e reattività. Le attività sono pienamente conformi al principio Do No Significant Harm (DNSH), in quanto la manutenzione predittiva riduce l'impatto ambientale associato alle ispezioni manuali, allo spreco di materiali e alle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Il quadro metodologico è strutturato attorno a tre pilastri complementari:

- Lo *Smart Environment Metamodel* (SEM), un framework concettuale per la modellazione dei sistemi di distribuzione idrica, che qui vengono considerati ambienti cyber-fisici intelligenti. Il SEM integra un livello di meta modellazione funzionale e un livello orientato ai dati, che formalizza le relazioni esistenti tra sorgenti informative eterogenee.

- La *Modeling Methodology for the Edge/Cloud Continuum* (MoMECC), una metodologia di modellazione strutturata per la distribuzione di task computazionali lungo il continuum Edge/Cloud. Operazioni computazionalmente leggere, come il pre-processing dei dati e la compressione semantica, possono essere eseguite in modo efficiente all'Edge (in prossimità dei sensori), riducendo la latenza e il carico di rete. Le operazioni più onerose, come l'addestramento di modelli di deep learning, sono invece gestite efficacemente nel Cloud.
- Il rilevamento delle anomalie basato su autoencoder. Viene proposto un approccio basato sull'IA per il rilevamento non supervisionato delle anomalie, che impiega un autoencoder di tipo Sparse U-Net. Il modello apprende i pattern operativi normali a partire dai dati dei sensori e segnala le anomalie in base alle deviazioni di un errore di ricostruzione. Ciò rende l'approccio di uso generale e in grado di adattarsi dinamicamente alle variazioni fisiologiche delle grandezze monitorate (ad esempio, quelle stagionali della domanda idrica), mantenendo al contempo un'elevata sensibilità ai guasti reali.

Per scopi di validazione, è stato sviluppato, nel contesto di un laboratorio di ricerca, un dimostratore che modella un sistema di distribuzione idrica e offre uno strumento per rilevare le anomalie. Il caso di studio utilizza dati reali di pressione, nei quali vengono introdotte deliberatamente anomalie sintetiche (ad esempio drift, guasti di tipo stuck-at, spike e rumore) al fine di valutare l'efficacia dell'approccio.

# Una procedura per la diagnosi di sistemi di condotte in pressione mediante prove in moto vario

Bruno Brunone<sup>1</sup>, Caterina Capponi<sup>1</sup>, Debora Falocci<sup>1</sup>, Silvia Meniconi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Perugia, Perugia, Italia, [bruno.brunone@unipg.it](mailto:bruno.brunone@unipg.it)

Presso il *Water Engineering Laboratory* ([welabpg.com](http://welabpg.com)) dell'Università degli Studi di Perugia è stata messa a punto una procedura per la diagnosi (individuazione di perdite, ostruzioni parziali, e deterioramento della parete della tubazione) di sistemi di condotte in pressione. Tale procedura (in inglese *Transient Test-Based Technique*, TTBT) si basa sulle proprietà delle onde di pressione e, in particolare, su quella per cui la loro interazione con le anomalie genera un'onda riflessa. Le caratteristiche delle onde riflesse dalle anomalie, che costituiscono altrettante singolarità nel segnale di pressione, dipendono da quelle dell'anomalia stessa, che può essere localizzata basandosi sul tempo di arrivo nella sezione di misura dell'onda riflessa.

TTBT è una procedura che si articola in tre fasi (Fig. 1). La prima prevede lo "studio del sistema", la "scelta del transitorio di prova", la "predisposizione del sistema" e la "definizione della procedura di prova". Nel corso della fase successiva, una volta "eseguite le prove di moto vario", si procede ad "analizzarne i risultati" e, quindi, alla "diagnosi del sistema". In seguito, "compiuti gli eventuali interventi di riparazione", si stabilisce definitivamente in ogni dettaglio il "transitorio di prova" e si acquisisce il "comportamento di riferimento del sistema" (ossia la risposta al transitorio di prova del sistema privo di anomalie). Messo a punto il transitorio di prova, la terza fase consiste essenzialmente nel *training on job* del personale dell'ente gestore. Le attività sono ripartite fra il WEL e il personale dell'ente gestore, che viene quindi coinvolto in prima persona con evidente risparmio di risorse e la garanzia della tempestività della diagnosi e degli eventuali interventi di riparazione. Per eseguire la diagnosi di sistemi di condotte in pressione, TTBT utilizza i segnali di pressione acquisiti durante prove di moto vario eseguite in piena sicurezza per gli impianti (cioè caratterizzate da onde di pressione di entità pari al più ad alcuni metri di colonna d'acqua). La TTBT, definita presso il WEL, è stata già applicata con successo in numerosi sistemi in esercizio come risulta dai lavori pubblicati su prestigiose riviste internazionali.

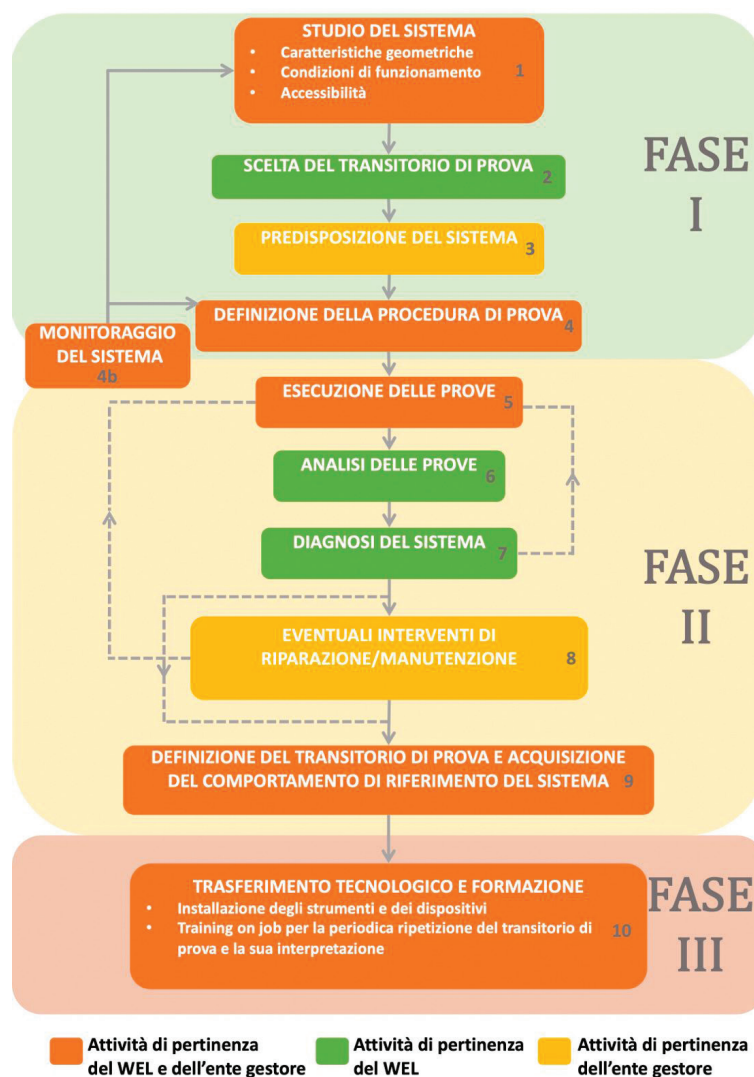


Figura 1 - La procedura TTBT per la diagnosi dei sistemi di condotte in pressione.

# RETURN Virtual TestBed: il processo di costruzione della rete di distribuzione idrica di Returnville Coastal

Lorenzo Carmelo Zingali<sup>1</sup>, Cristiana Bragalli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Bologna, Italia, [lorenzo.zingali2@unibo.it](mailto:lorenzo.zingali2@unibo.it)



Figura 1 - Rete di distribuzione idrica di Returnville Coastal e dettaglio delle condotte con identificazione degli utenti a livello di edificio

Le reti di distribuzione idrica (WDNs) costituiscono infrastrutture critiche, garantendo la salute pubblica e lo sviluppo socioeconomico. La loro configurazione dipende dal contesto ambientale, dallo sviluppo nel tempo del tessuto urbano, nonché dalla disponibilità e localizzazione delle risorse idriche. Nell'ambito dell'analisi quantitativa della resilienza delle comunità, i Virtual TestBeds (VTBs) si sono rivelati strumenti efficaci per test preliminari degli algoritmi di resilienza comunitaria.

Returnville Coastal WDN è stata costruita utilizzando dati fondamentali quali rete stradale, distribuzione degli edifici e dati demografici a livello di sezione censuaria. La rete si estende principalmente lungo la costa ed in parte in una valle interna interessata da un corso d'acqua. La configurazione della WDN riflette la disposizione spaziale del territorio, garantendo copertura

sia dei settori costieri sia di quelli interni (Figura 1). Per quanto riguarda le risorse idriche, sono presenti due sorgenti e un campo pozzi che attinge dai depositi alluvionali, con estrazione limitata dai livelli della falda per prevenire l'intrusione salina. La variabilità topografica e l'alimentazione, parzialmente a gravità, richiedono un controllo differenziato della pressione, mediante l'installazione di valvole riduttrici laddove necessario. Il consumo idrico giornaliero e le perdite lineari sono stati stimati sui valori medi nazionali (ARERA, 2023), rispettivamente 204 l/abitante/giorno e 17,9 m<sup>3</sup>/km/giorno. La composizione dei materiali delle condotte, per una lunghezza complessiva di 277 km, è stata definita rispettando la distribuzione percentuale delle reti italiane come indicata da ARERA.

Returnville Coastal WDN è stata progettata seguendo un quadro metodologico che riproduce i principali passaggi ingegneristici nella costruzione delle reti idriche: sono stati individuati i percorsi primari più idonei al trasferimento delle risorse idriche, mediante un approccio algoritmico basato sulla teoria dei grafi, mentre il dimensionamento dei diametri delle condotte è stato effettuato tramite un algoritmo di ottimizzazione collegato al modello idraulico, con prestazioni idrauliche rilassate per riprodurre il generale sovradimensionamento delle condotte nelle reti reali.

È possibile quindi valutare molteplici scenari di impatto dei rischi ambientali sulle componenti infrastrutturali e sulla continuità di erogazione idrica alla popolazione. Le forzanti considerate sono quelle individuate nell'ambito del VTB di Returnville Coastal, in particolare gli eventi franosi classificati come debris-flow indotti dall'alluvione, che compromettono la sorgente situata nell'area interessata, a causa dei danni all'infrastruttura idrica.



# Modellazione del deterioramento e valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture di distribuzione idrica: Proof of Concept di Parma

Lorenzo Carmelo Zingali<sup>1</sup>, Alessandro Lombardini<sup>1</sup>, Cristiana Bragalli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Bologna, Italia, [cristiana.bragalli@unibo.it](mailto:cristiana.bragalli@unibo.it)

Le reti di distribuzione idrica (Water Distribution Networks, WDNs) sono infrastrutture critiche vitali per il benessere della popolazione e lo sviluppo socio-economico dei territori. La capacità di svolgere con continuità la funzione essenziale di trasporto della risorsa idrica dalle fonti fino agli utenti è strettamente legata alla vulnerabilità intrinseca, funzione della variabilità delle risorse idriche in relazione alle esigenze legate alle attività umane, ed al deterioramento strutturale derivante dagli effetti combinati dovuti principalmente alle proprietà delle condotte, alle variabili ambientali, alle pratiche operative ed all'impatto dei carichi esterni sull'infrastruttura.

La metodologia di modellazione numerica data-driven applicata al proof of concept di Parma comprende molteplici dimensioni, strettamente interconnesse tra loro a causa della natura sistemica delle WDNs: la *dimensione topologica*, affrontabile mediante la teoria dei grafi; la *dimensione strutturale*, che include modelli rappresentativi dello stato di degrado dell'infrastruttura; la *dimensione idraulica*, riprodotta tramite modelli numerici che descrivono il moto del fluido; la *dimensione ambientale*, basata sulla rappresentazione delle condizioni al contorno, e la *dimensione socio-economica*, fondata su modelli che rappresentano la domanda idrica attraverso la quantificazione dei fabbisogni attuali e futuri. La metodologia mira ad integrare tali dimensioni, adottando un approccio orientato a supportare una visione globale delle infrastrutture di distribuzione idrica.

La rete di distribuzione idrica di Parma è gestita da IREN S.p.A. che, nel contesto del progetto RETURN, ha reso disponibile il Proof of Concept (POC) di Parma. A partire dalle informazioni fornite è stato sviluppato un modello idraulico sufficientemente rappresentativo del sistema reale, costituito da un grafo composto da 24.020 nodi, inclusi quelli di accumulo, e 25.052 archi (18.503 condotte, 6.476 valvole e 73 pompe). La lunghezza complessiva è pari a 832,7 km. La domanda media allocata è pari a 612 l/s, di cui il 68% attribuibile ai consumi idrici. Lo scenario

futuro di consumo idrico è stato considerato stazionario, in coerenza con le proiezioni sull'evoluzione demografica. In un contesto data-driven caratterizzato da una forte specificità territoriale, la disponibilità e la qualità dei dati rivestono un ruolo centrale. Ciò comprende anche le informazioni per modellare accuratamente i guasti e comprendere i meccanismi di deterioramento sottostanti. L'applicazione di metodi data-driven per la modellazione del deterioramento, al fine di supportare il processo decisionale in contesti con dati limitati, viene presentata attraverso una valutazione unificata basata su regressione, classificazione, survival analysis ed approcci euristici applicati al POC di Parma, integrando attributi delle condotte e parametri idraulici, al fine di valutare le prestazioni dei modelli in condizioni realistiche. In particolare, per il compito di classificazione delle condotte in base al rischio di guasto, viene effettuato un confronto tra diversi modelli, direttamente rilevante per le decisioni operative, che sono altresì valutati rispetto ai compiti per i quali sono specificamente concepiti, quali la previsione del tempo al guasto per i modelli di regressione e di analisi di sopravvivenza e la stima della probabilità di guasto per i modelli di classificazione.

Studi precedenti hanno evidenziato come la combinazione di strategie multiple possa migliorare la capacità di generalizzazione e l'accuratezza predittiva dei modelli. Il modello idraulico avanzato del POC di Parma è stato implementato mediante Python WNTR, che consente l'esecuzione di molteplici analisi. Il modello pressure-driven è stato impiegato in simulazioni di lungo periodo sotto condizioni di variabilità delle risorse idriche, attribuibili all'abbassamento della falda acquifera dovuto agli effetti del cambiamento climatico e alla temporanea indisponibilità operativa di gruppi di pozzi compromessi da fenomeni di contaminazione. I risultati ottenuti possono essere integrati nella valutazione di vulnerabilità e nella validazione di possibili interventi di mitigazione del rischio associato.





# Simulazione estensiva ed automatizzata con Infoworks WS Pro per guidare gli investimenti nelle reti di distribuzione idrica

Luisa Lavalle<sup>1</sup>, Maria Luisa Villani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Analisi E Modelli per le Infrastrutture Critiche e i Servizi essenziali (TERIN-ICER-ICS), ENEA, Roma, Italia, [luisa.lavalle@enea.it](mailto:luisa.lavalle@enea.it)

Questo lavoro presenta un framework avanzato e modulare di simulazione per la resilienza infrastrutturale, capace di integrare simulatori di dominio con un approccio multirischio, con l'obiettivo di analizzare, in modo realistico, guasti a cascata e impatti sistemici, orientando gli investimenti verso ciò che è davvero critico.

Il framework si basa su strumenti ampiamente utilizzati, come InfoWorks WS Pro per le reti idropotabili, che – pur essendo affidabili – nascono per la pianificazione di lungo periodo e non catturano appieno le perturbazioni complesse, generate dagli eventi climatici estremi. Per colmare questa lacuna sono stati sviluppati meccanismi di interfaccia che iniettano dinamicamente i guasti e ne controllano l'evoluzione, trasformando il simulatore in uno strumento operativo in grado di valutare l'impatto reale di terremoti, alluvioni, siccità o blackout, evidenziando non solo il comportamento dei singoli componenti, ma anche gli effetti complessivi sul servizio. I guasti vengono stimati tramite curve di fragilità validate a livello internazionale, aggiornabili con modelli più avanzati, inclusi approcci AI-driven o analisi numeriche non lineari. La natura modulare dell'architettura permette di integrare facilmente nuove conoscenze, dati di monitoraggio, modelli di pericolosità più accurati e previsioni basate su machine learning, garantendo evolutività e aderenza al progresso

scientifico. L'ambiente di simulazione consente di valutare l'impatto di diversi scenari naturali (terremoti, alluvioni, siccità), analizzare combinazioni di eventi successivi e stimare costi e benefici degli interventi.

L'applicazione a un caso reale mostra un risultato di grande interesse: nonostante la complessità della rete, solo il 10% dei guasti, spesso concentrati in aree contigue, risulta realmente critico (Fig. 1). Questo indica che interventi mirati possono produrre un notevole miglioramento dell'affidabilità del servizio. L'analisi evidenzia inoltre vulnerabilità spesso trascurate, come il breakflow e la dipendenza dalla rete elettrica: sostituzioni mirate dei materiali più fragili possono ridurre la vulnerabilità complessiva fino al 90%, mentre scenari di blackout diffuso minacciano la disponibilità di idranti in emergenza.

Il valore aggiunto di questo approccio è duplice:

1. offre una base quantitativa solida per giustificare investimenti, piani di manutenzione e strategie di mitigazione;
2. riduce il tempo e l'incertezza delle decisioni, identificando in anticipo gli scenari prioritari.

Pur non sostituendo l'esperienza dei tecnici, la simulazione permette di analizzare ciò che sarebbe impossibile valutare manualmente: decine di migliaia di scenari, con la certezza di non trascurare nulla.

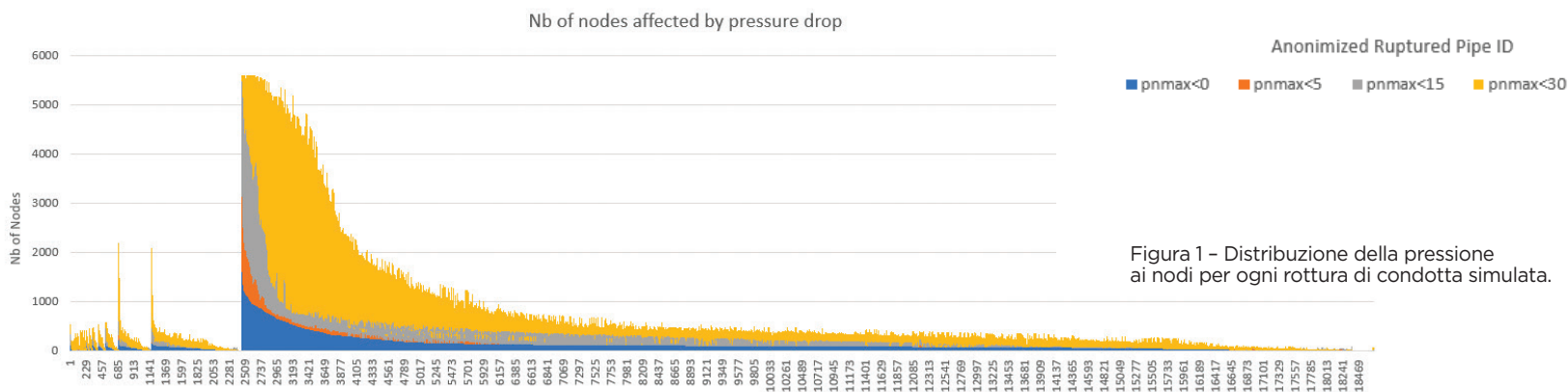


Figura 1 - Distribuzione della pressione ai nodi per ogni rottura di condotta simulata.



# Metodologie integrate per l'indagine, l'analisi e la valutazione della vulnerabilità arginale ai fenomeni di erosione retrogressiva da sottofiltrazione

Guido Gottardi<sup>1</sup>, Ilaria Bertolini<sup>1</sup>, Michela Marchi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento DICAM, Università di Bologna, Bologna, Italia, [ilaria.bertolini3@unibo.it](mailto:ilaria.bertolini3@unibo.it)

Il meccanismo di collasso arginale per erosione retrogressiva da sotto filtrazione (o *backward erosion piping* - BEP) rappresenta una minaccia rilevante per la stabilità degli argini fluviali, in particolare quelli a protezione dei grandi fiumi di piana alluvionale fondati su terreni permeabili. Il fenomeno si manifesta tipicamente durante eventi di piena di medio-alta intensità, quando vengono a generarsi forze di filtrazione rilevanti all'interno degli strati di fondazione.

Se lo strato sabbioso di fondazione non è confinato, il BEP tende a manifestarsi al piede arginale, generando diffuse venute d'acqua. In presenza di uno strato meno permeabile di copertura (*blanket*) sovrastante l'acquifero sabbioso, l'erosione si manifesta in corrispondenza di discontinuità locali: in tali condizioni i canali erosivi si sviluppano all'interfaccia *blanket*-acquifero come conseguenza dell'asportazione delle particelle di sabbia da parte del flusso di sotto filtrazione. L'accumulo del materiale eroso nei punti di fuoriuscita forma strutture caratteristiche denominate "*sand boils*" o, gergalmente, "fontanazzi". La crescita dimensionale dei canali erosivi e la loro progressione retrogressiva verso la sorgente del carico idraulico aumentano la vulnerabilità dell'argine fino al possibile raggiungimento di una condizione di collasso.

La riduzione del rischio associato al BEP richiede una conoscenza approfondita dei processi di filtrazione negli strati permeabili di fondazione, con particolare attenzione alla zona di efflusso. Una corretta simulazione della dinamica del processo di filtrazione nei terreni soggetti a BEP è fondamentale e dipende dal-

la definizione accurata del profilo stratigrafico locale e dalla calibrazione dei parametri geotecnici chiave, possibile solo attraverso un'ampia raccolta di dati. Tali informazioni derivano da una combinazione di prove di laboratorio e in sito, da sistemi di monitoraggio adeguatamente progettati e da dati documentali sui precedenti eventi di riattivazione dei fontanazzi. Viene quindi proposta una metodologia di indagine strutturata e progressiva per sezioni arginali affette – o potenzialmente affette – da BEP, la cui applicazione viene testata su due sezioni arginali del fiume Po, in località Guarda Ferrarese (FE) e Mazzorno Sinistro (RO), in corrispondenza delle quali sono stati osservati numerosi fontanazzi, alcuni attivi altri dormienti. La metodologia si articola in tre livelli consequenziali di indagine: raccolta e analisi dei dati esistenti, interpretazione storico-geologica e ispezioni di campo; campagne mirate di prove geotecniche e geofisiche in sito e di laboratorio e attività di monitoraggio piezometrico per la definizione del regime idraulico e l'individuazione di possibili condizioni di riattivazione del fenomeno del BEP.

La metodologia fornisce criteri operativi per la scelta delle prove in sito, delle prove di laboratorio e delle attività di monitoraggio, nonché per l'interpretazione dei dati a supporto della modellazione numerica del fenomeno. L'obiettivo finale è la costruzione di un modello geotecnico affidabile, indispensabile per progettare opportune strategie di mitigazione per ridurre il rischio associato al BEP e garantire la stabilità a lungo termine dei rilevati arginali.



# Sviluppo di una metodologia di gestione del rischio NaTech basata sulla resilienza: esempio di applicazione alle infrastrutture critiche energetiche

David Javier Castro Rodriguez<sup>1</sup>, Antonello A. Barresi<sup>1</sup>, Micaela Demichela<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia (DISAT), Politecnico di Torino, Torino, Italia, [david.castro@polito.it](mailto:david.castro@polito.it)

Gli impianti industriali, un tempo considerati entità isolate, sono oggi riconosciuti come sistemi sociotecnici complessi (SETS), operanti all'interno di reti interconnesse e caratterizzati da interazioni dinamiche con l'ambiente circostante. L'aumento degli eventi naturali estremi, favorito dai cambiamenti climatici, ha evidenziato la crescente vulnerabilità di tali sistemi ai fenomeni NaTech (natural hazard-triggered technological). Le metodologie convenzionali di valutazione del rischio NaTech tendono a concentrarsi sulle conseguenze di breve termine, trascurando spesso le dimensioni territoriali sistemiche, multirischio e di lungo periodo associate a tali eventi. La presente ricerca promuove un avanzamento nella gestione del rischio NaTech attraverso un quadro metodologico basato sulla resilienza, sviluppato a partire dalle esperienze maturate nel settore delle infrastrutture critiche energetiche e finalizzato a sistematizzare l'integrazione dei principi di resilienza nella gestione del rischio NaTech.

In primo luogo, la fase di *Awareness* favorisce una valutazione proattiva della vulnerabilità, cogliendo le interdipendenze tra una centrale termoelettrica e i molteplici pericoli presenti nel suo contesto territoriale mediante analisi qualitative, quantitative e spaziali. In secondo luogo, la fase di *Preparedness* è condotta attraverso un innovativo strumento di valutazione multirischio, capace di considerare la vulnerabilità dinamica di otto categorie di apparecchiature esposte a scenari di pericolo singoli o combinati, supportando processi decisionali tecnologici e specifici al contesto.

Le misure di *Recovery*, a differenza dei due step precedenti della metodologia, richiedono un approccio ad hoc, fortemente dipendente dalle caratteristiche del singolo caso. A questo proposito, viene presentato un caso esemplificativo, basato su un'analisi retrospettiva di eventi di

contaminazione da idrocarburi indotti da precipitazioni intense in impianti di produzione energetica distribuita. I casi di studio illustrano possibili percorsi verso interventi sostenibili di bonifica e recupero, con implicazioni sulla capacità di adattamento a lungo termine delle infrastrutture energetiche critiche in scenari NaTech. I risultati contribuiscono a convalidare la metodologia proposta, colmando il divario tra innovazione metodologica e applicazione pratica, rafforzando così la capacità dei sistemi industriali di anticipare, resistere e adattarsi agli eventi naturali. In conclusione, l'approccio proposto migliora la comprensione e la governance dei rischi NaTech, supportando la resilienza delle infrastrutture energetiche in un panorama climatico e tecnologico in continua evoluzione. Una rappresentazione della complessità degli eventi NaTech è contenuta in Fig. 1.

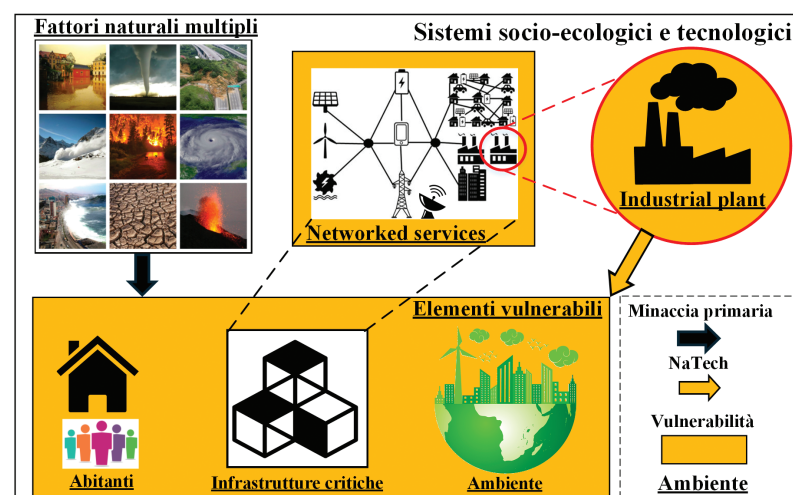


Figura 1 - Interazione tra rischi naturali, infrastrutture critiche ed elementi vulnerabili.

# Analisi dei disastri NaTech e valutazione del rischio per la resilienza delle infrastrutture industriali

Chiara Vianello<sup>1</sup>, Giulia De CET<sup>2</sup>, Elena Capasso<sup>3</sup>, Almerinda Di Benedetto<sup>3</sup>, Micaela Demichela<sup>4</sup>, Antonello Barresi<sup>4</sup>, Morena Vitale<sup>4</sup>, David Javier Castro Rodriguez<sup>4</sup>, Francesca Da Porto<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Padova, Padova, Italia, [chiara.vianello@unipd.it](mailto:chiara.vianello@unipd.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria civile edile e ambientale, Università degli Studi di Padova, Padova, Italia

<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale, Università di Napoli Federico II, Napoli, Italia

<sup>4</sup> Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia, Politecnico di Torino, Torino, Italia

<sup>5</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova, Padova, Italia

I disastri NaTech (Natural Hazard Triggering Technological Disasters) sono eventi nei quali i fenomeni naturali estremi innescano incidenti tecnologici, con potenziali conseguenze rilevanti per infrastrutture industriali, ambiente e popolazione. La loro importanza è in costante crescita a causa dell'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici severi e della crescente complessità dei sistemi industriali.

Gli eventi NaTech rappresentano una quota significativa degli incidenti industriali e mostrano una chiara tendenza all'aumento. Essi sono caratterizzati da una forte complessità, derivante dall'interazione tra pericoli naturali e vulnerabilità degli impianti tecnologici. Scenari tipici includono terremoti, che danneggiano impianti industriali; alluvioni, che provocano il rilascio di sostanze pericolose, ed eventi meteorologici estremi, che compromettono reti energetiche e di comunicazione.

Le conseguenze possono manifestarsi sia nel breve che nel lungo periodo, includendo incendi, esplosioni, contaminazione ambientale, impatti sulla salute pubblica e danni economici significativi. La valutazione del rischio NaTech richiede pertanto un approccio integrato, basato sull'analisi delle interazioni tra eventi naturali e infrastrutture industriali, secondo una logica multirischio.

Nel contesto del progetto PNRR, l'attività presentata si

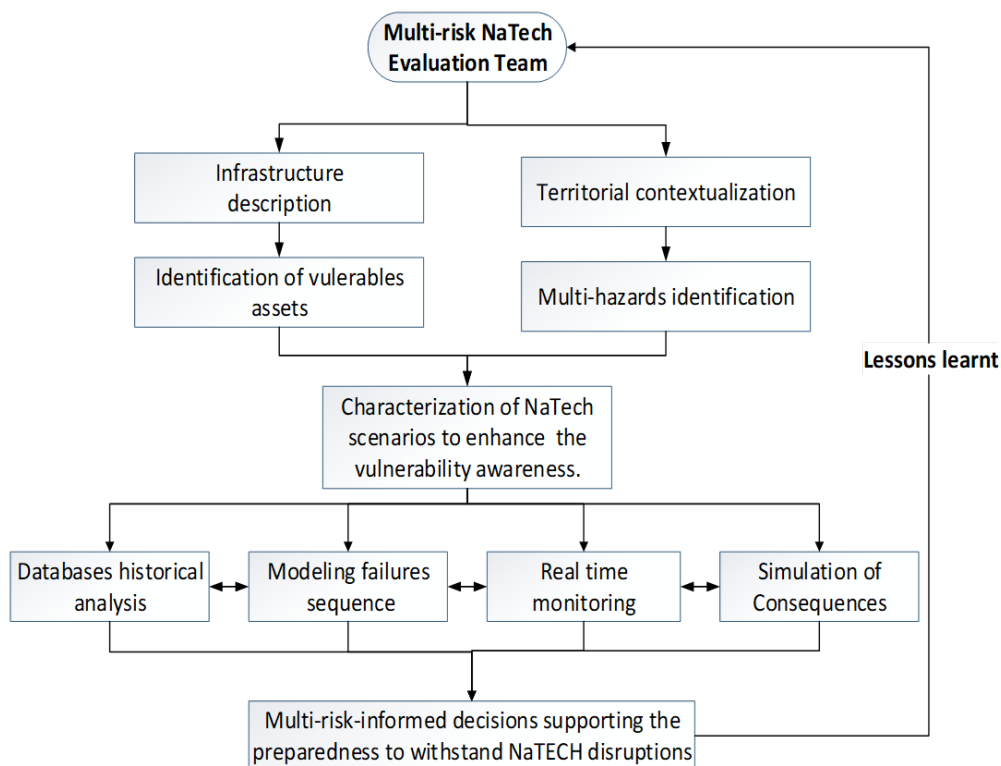


Figura 1 - Valutazione multi-rischio degli eventi NaTech

concentra sull'analisi dei dati relativi agli eventi NaTech e sull'applicazione di metodologie avanzate di valutazione del rischio. Lo studio consente di supportare la definizione di strategie di mitigazione e di contribuire allo sviluppo di infrastrutture industriali più resilienti.

# Valutazione multi-pericolo in contesti territoriali complessi: proposta metodologica applicata agli impianti di depurazione

Maria Castiglione<sup>1</sup>, Santo Fabio Corsino<sup>1</sup>, Michele Torregrossa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italia, [maria.castiglione01@unipa.it](mailto:maria.castiglione01@unipa.it)

Negli ultimi decenni, l'aumento della frequenza e dell'intensità dei disastri naturali ha reso sempre più evidente la necessità di approcci integrati per la valutazione multi-pericolo. In questo contesto, la Direttiva (UE) 2022/2557 impone agli Stati membri di identificare i principali pericoli naturali e di sviluppare strategie di resilienza per le infrastrutture critiche entro il 2026. Tuttavia, le infrastrutture di protezione ambientale, come gli impianti di trattamento delle acque reflue, risultano spesso trascurate in questi modelli, nonostante la loro elevata vulnerabilità e il ruolo essenziale nella tutela della salute pubblica e dell'ambiente. Il presente studio propone un approccio metodologico innovativo, finalizzato alla valutazione dell'esposizione dei WWTPs a molteplici pericoli naturali, che è stato applicato in regione Sicilia, un contesto territoriale caratterizzato dalla coesistenza e dall'interazione di numerosi pericoli naturali. Nella metodologia proposta sono stati considerati cinque principali pericoli: sismico, geomorfologico (frane), idraulico (alluvioni), vulcanico e tsunami. Le mappe tematiche di pericolosità, derivate da fonti nazionali e regionali, sono state armonizzate mediante processi di normalizzazione e riclassificate in quattro classi di intensità. Il territorio siciliano è stato discretizzato in una griglia regolare di celle di 200 × 200 m, per ciascuna delle quali è stato calcolato un indicatore di pericolosità specifico per ogni fenomeno. Successivamente, sono stati testati tre differenti schemi di pesatura per la costruzione dell'indice multi-pericolo (Multi-Hazard Index, MHI): pesatura uniforme, con contributo uguale di tutti i pericoli; pesatura dinamica basata

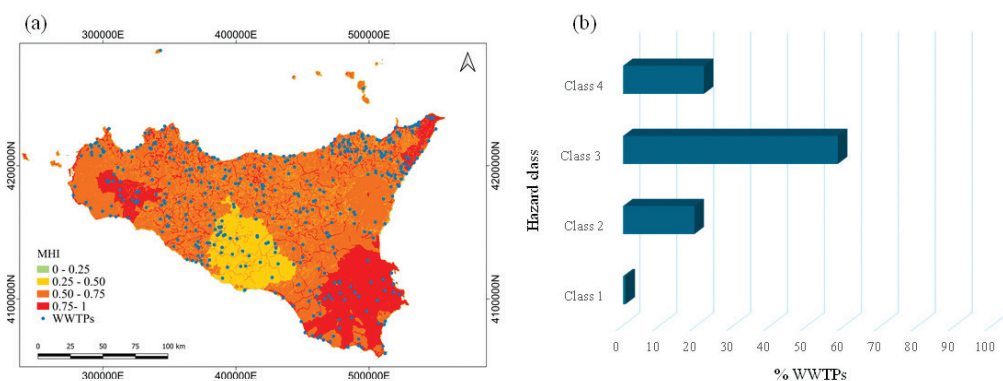


Figura 1 - Distribuzione spaziale degli impianti di depurazione nello schema 3 con classificazione basata sull'indice MHI: (a) mappa con la localizzazione degli impianti; (b) percentuale degli impianti in ogni classe

sulla presenza effettiva dei pericoli in ciascuna cella e pesatura dinamica basata sulle interazioni tra pericoli, integrando relazioni di dipendenza attraverso matrici di interazione derivate e adattate dalla letteratura. L'indice MHI è stato quindi classificato in quattro livelli di pericolosità e sovrapposto alla distribuzione spaziale dei WWTPs per valutare la loro esposizione complessiva. I risultati mostrano come la scelta della strategia di pesatura influenzi in modo significativo la distribuzione spaziale del MHI. In particolare, l'approccio basato sulle interazioni tra pericoli ha restituito una rappresentazione più equilibrata e coerente dei fenomeni, riducendo il rischio di sovra o sottostima. L'applicazione di tale modello ai WWTPs siciliani evidenzia che circa l'80% degli impianti ricade in aree a pericolosità elevata o molto elevata (Fig. 1), sottolineando una marcata vulnerabilità delle infrastrutture idriche regionali e la necessità di strategie mirate di mitigazione e resilienza.



# Tool per l'estrazione multi-scala e la selezione semi-automatica di feature geometriche da nuvole di punti per il monitoraggio delle infrastrutture

Alessandra Spadaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [alessandra.spadaro@polito.it](mailto:alessandra.spadaro@polito.it)

La sicurezza delle infrastrutture richiede sistemi di analisi sempre più rapidi ed efficienti, capaci di individuare precocemente segnali di degrado strutturale, come fratture, distacchi o fenomeni di erosione. In questo contesto, l'impiego di modelli di Machine Learning e Deep Learning applicati a nuvole di punti tridimensionali rappresenta uno strumento promettente, ma trova un ostacolo significativo nella fase preliminare di preparazione del dataset. Il calcolo delle caratteristiche geometriche e la scelta dei parametri ottimali di analisi, infatti, sono attività onerose, soprattutto quando si lavora su grandi quantità di dati acquisiti da rilievi LiDAR o fotogrammetrici.

Il tool sviluppato affronta questa criticità proponendo un sistema integrato, rapido e scalabile per il calcolo e la selezione delle feature geometriche che descrivono la struttura locale della superficie, incluse la distribuzione spaziale dei punti, l'orientazione e il grado di regolarità o discontinuità.

La prima fase automatizza il calcolo di un ampio insieme di caratteristiche derivate dall'analisi locale della geometria, applicate a molteplici raggi di ricerca definiti dall'utente. Ogni set di feature viene integrato direttamente nella nuvola di punti, insieme ai metadati relativi ai tempi di elaborazione e ai parametri utilizzati. Questo processo consente di ottenere, in tempi ridotti, un database ricco e strutturato, particolarmente utile per l'addestramento di modelli per la rilevazione automatica di fratture e discontinuità in opere infrastrutturali.

La seconda fase introduce una piattaforma di visualizzazione interattiva, che permette di confrontare agevolmente le feature calcolate per ciascun raggio. L'utente può così individuare quali configurazioni de-

scrivono meglio la morfologia delle superfici e quale scala di analisi consente di evidenziare, con maggiore chiarezza, l'insorgenza di macro-fratture o di anomalie geometriche. I dati selezionati vengono infine esportati in un file dedicato, pronto per l'addestramento di modelli ML/DL orientati alla diagnosi strutturale.

Questo strumento contribuisce a velocizzare la fase di preprocessing dei dati e a migliorare la qualità dei dataset per applicazioni di monitoraggio infrastrutturale, favorendo un approccio più efficiente e riproducibile alla valutazione del rischio e al supporto alle decisioni. Una rappresentazione dei risultati è riportata in Fig. 1.

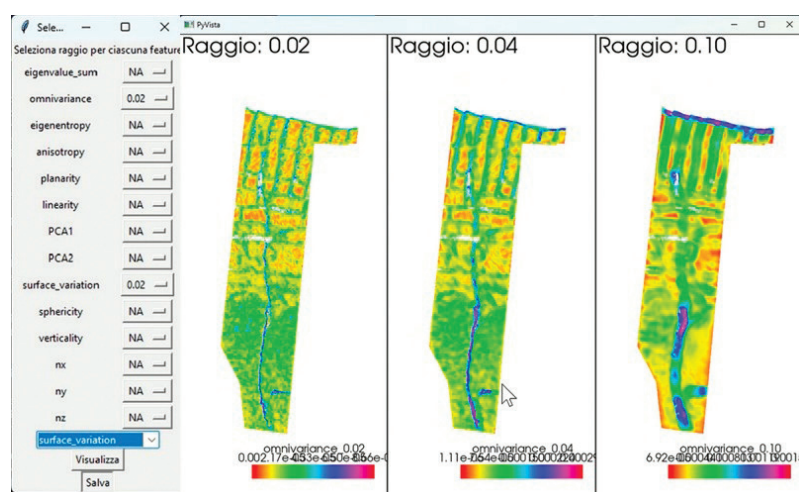


Figura 1 - Visualizzazione comparativa della feature geometrica (omnivariance) calcolata a differenti raggi di ricerca (0,02 m, 0,04 m, 0,10 m), utile per individuare la scala più efficace nell'evidenziare fratture e discontinuità.





# Indagini integrate e realtà aumentata a supporto della resilienza delle gallerie: il caso studio di San Lorenzo

Roberta Zambrini<sup>1</sup>, Andrea Zamariolo<sup>1</sup>, Giulia Casagrande<sup>1</sup>, Davide Martinucci<sup>1</sup>, Marco Possamai<sup>1</sup>, Caterina Zei<sup>2</sup>, Cristian Pieroni<sup>3</sup>, Lisa Borgatti<sup>4</sup>, Pietro Festi<sup>4</sup>, Luca Vittuari<sup>4</sup>, Stefano Gandolfi<sup>4</sup>, Alessandra Tini<sup>4</sup>, Matteo Cappuccio<sup>4</sup>, Gianluca Marcato<sup>5</sup>, Angelo Ballaera<sup>5</sup>, Nicolò Bertone<sup>1</sup>, Mirko Francioni<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Esplora Srl, Trieste, Italia, [roberta@esplorasrl.it](mailto:roberta@esplorasrl.it)

<sup>2</sup> Università degli Studi di Ferrara, Italia

<sup>3</sup> Università degli Studi di Urbino, Italia

<sup>4</sup> Università degli Studi di Bologna, Italia

<sup>5</sup> CNR Irpi Padova, Italia

La crescente ricorrenza di pericoli geo-idrologici nelle regioni montane richiede approcci innovativi per valutare la vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto esposte all'instabilità dei versanti. Nell'ambito del programma RETURN (Spoke 6 TS2), è stato condotto uno studio approfondito sulla galleria di San Lorenzo (SS52, Ampezzo, Italia), un asset critico interessato da frane di diversa tipologia e magnitudo. Lo studio ha integrato in modo sinergico dati topografici multi-sensore ad alta risoluzione e dati georadar con piattaforme digitali per un'interpretazione strutturale avanzata, il monitoraggio e la visualizzazione immersiva.

La metodologia integrata ha incluso: una mappatura topografica a scala centimetrica tramite reti GNSS e stazione totale, affiancata da laser scanner terrestri con acquisizione di ~1,5 miliardi di punti; indagini GPR multifrequenza (80-1500 MHz), mirate ai settori critici della galleria per rilevare distribuzioni di umidità, discontinuità di interfaccia e anomalie diffrattive, e diagnostica strutturale mediante prove con martinetti piatti per la valutazione degli stati tensionali e monitoraggio, in tempo reale basato su IoT, delle tensioni del rivestimento. I dataset armonizzati sono stati organizzati in un geodatabase, con i risultati geofisici visualizzati in modalità immersiva su Meta Quest 3 a supporto del processo decisionale.

I principali risultati dimostrano l'efficacia della combinazione tra GPR e laser scanning nel distinguere zone indisturbate da zone degradate della galleria, individuando sistemi di fratture e anomalie di contatto non rilevabili con le ispezioni standard. È stata inoltre mappata l'umidità, significativamente più elevata in prossimità dell'imbocco Forni e in aree precedentemente considerate indisturbate, evidenziando la necessità di diagnosi non invasive e cross-validate. Il monitoraggio strutturale in tempo reale si è rivelato fattibile, consentendo il tracciamento continuo delle tensioni tramite dashboard web e sistemi di allerta su soglia.

Rispetto alle pratiche consolidate di diagnostica in galleria, questa ricerca introduce: un'integrazione fluida di dataset multi-risoluzione all'interno di repository conformi ai principi FAIR; la visualizzazione immersiva in VR per l'ingaggio tecnico e degli stakeholder e la validazione di metodi scalabili e non distruttivi per la gestione del rischio idrogeologico.

Lo studio contribuisce allo sviluppo di protocolli per infrastrutture resilienti, integrando geoscienze, ingegneria e paradigmi di digital twin. Le attività future verificheranno le anomalie mediante carotaggi/endoscopie mirati e correleranno i risultati con dati pluviometrici, al fine di affinare modelli predittivi di danneggiamento.





# IULIAN: la piattaforma AI per l'accesso guidato e semplificato alle informazioni da dati satellitari

Matteo Rolle<sup>1</sup>, Luca Salerno<sup>1</sup>, Luca Monaco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CLIRA, Torino, Italia, [info@clira.cloud](mailto:info@clira.cloud)

CLIRA è una startup innovativa e spin-off del Politecnico di Torino che affronta una delle barriere più persistenti nel settore dell'Osservazione della Terra (EO): la complessità tecnica che impedisce a professionisti e organizzazioni di utilizzare efficacemente le informazioni satellitari nelle loro operazioni quotidiane. L'accesso ai dati EO richiede tipicamente competenze di programmazione, telerilevamento e GIS, che molti potenziali utenti non possiedono. CLIRA supera questa limitazione attraverso IULIAN, una piattaforma no-code assistita da intelligenza artificiale, che trasforma i dati EO in prodotti informativi pronti all'uso, direttamente accessibili a ingegneri, consulenti e pubbliche amministrazioni.

IULIAN consente un'interazione in linguaggio naturale, alimentata da un Large Language Model (LLM) che guida gli utenti nella formulazione delle loro richieste, recupera e processa automaticamente i dati EO rilevanti, fornendo output validati come mappe, indicatori e relazioni tecniche. Automatizzando l'intero flusso di lavoro dai dati all'informazione, CLIRA elimina la necessità di personale specializzato, riduce i tempi di analisi fino al 90% e standardizza la qualità dei risultati.

Nel contesto della sicurezza delle infrastrutture, IULIAN offre capacità particolarmente rilevanti per il

monitoraggio strutturale, la rilevazione di deformazioni e l'analisi dei rischi. La piattaforma permette di processare automaticamente dati interferometrici satellitari per identificare subsidenze, movimenti franosi e deformazioni di ponti, dighe, ferrovie e reti stradali. Gli utenti, ad esempio, possono richiedere di monitorare i movimenti del suolo lungo una specifica infrastruttura in un determinato periodo temporale e ricevere immediatamente mappe di spostamento, serie temporali e indicatori di allerta, senza dover gestire manualmente complessi dataset satellitari.

La piattaforma integra analisi multi-temporali per la valutazione dell'esposizione al rischio idrogeologico, permettendo di correlare eventi meteorologici estremi con i loro effetti sulle infrastrutture critiche. Questa capacità è fondamentale per i gestori infrastrutturali e le autorità di protezione civile, che necessitano di sistemi rapidi ed affidabili per la sorveglianza territoriale e la pianificazione degli interventi manutentivi. IULIAN si differenzia dalle piattaforme EO esistenti attraverso tre vantaggi chiave: un'interfaccia veramente no-code che non richiede programmazione, un livello di guida basato su AI che interpreta le esigenze degli utenti e un sistema di reportistica tecnica automatizzata che garantisce trasparenza e riproducibilità.



# Monitoraggio MT-InSAR di infrastrutture di trasporto attraverso analisi cinematica cell-based: Architettura e Workflow del progetto ARTEMON-BT

(Advanced Remote TEchniques for MONitoring of Bridges and Tunnels)

Raffaele Nutricato<sup>1</sup>, Davide Oscar Nitti<sup>1</sup>, Filomena Ciola<sup>1</sup>, Alessandro Parisi<sup>1</sup>, Marco Savoia<sup>2</sup>, Raffaele Landolfo<sup>3</sup>, Andrea Miano<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Applications Processing (GAP) srl, Bari, Italia, [info@gapsrl.eu](mailto:info@gapsrl.eu)

<sup>2</sup> Dipartimento DICAM, Università di Bologna, Bologna, Italia

<sup>4</sup> Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università Federico II, Napoli, Italia

<sup>4</sup> Department of Engineering-Pegaso University, Napoli, Italia

Il monitoraggio di reti infrastrutturali, in particolare di ponti e di gallerie, è un aspetto cruciale nel garantire la sicurezza della viabilità. Ad oggi, il telerilevamento satellitare SAR ha assunto un ruolo di primo piano per il monitoraggio remoto di spostamenti su ampia scala, attraverso tecniche interferometriche multi-temporali (MT-InSAR), le quali consentono di rilevare l'evoluzione spazio-temporale di fenomeni di spostamenti del terreno su vasta scala, attraverso l'analisi di bersagli radar stabili nel tempo, noti come Persistent Scatterers (PS). Su scala locale, l'analisi dei PS può essere uno strumento valido per effettuare valutazioni preliminari sugli spostamenti di opere d'arte specifiche, come ponti e gallerie. L'obiettivo principale del progetto ARTEMON-BT è stato quello di sviluppare un workflow metodologico basato sull'estrazione di parametri cinematici PS-based per il controllo da remoto di infrastrutture lineari, in particolare di ponti e di gallerie, al fine di indirizzare ispezioni di dettaglio volte a prevenire potenziali criticità strutturali. A tale scopo, sono stati approfonditi aspetti legati alla sensibilità delle misure interferometriche a partire da dataset multi-missione di dati satellitari SAR (Sentinel-1 per la banda C, e COSMO-SkyMed - CSK/CSG per la banda X), investigando l'uso di riflettori artificiali per migliorare la copertura spaziale dei PS e valutare soluzioni in grado di garantire visibilità sia multi-missione, sia su più geometrie di acquisizione. La metodologia sviluppata (Fig. 1) si è basata su una discretizzazione cell-based lungo l'asse infrastrutturale con estensione laterale al fine di includere il contesto territoriale al contorno. Per ogni PS e per ogni cella, sono stati estratti parametri cinematici (velocità media e relative variazioni, accelerazione

e ampiezza stagionale) al fine di generare eventuali flag puntuali e successivamente aggregati in un flag globale per consentire una classificazione immediata di aree potenzialmente critiche. La procedura è stata testata con dati Sentinel-1 su casi di studio reali, ed è stata dimostrata la capacità del sistema di individuare hotspot cinematici riconducibili a fenomeni non lineari, accelerazioni localizzate o variazioni significative nelle condizioni recenti, confermando l'affidabilità del workflow come strumento preliminare per il monitoraggio e la gestione territoriale del rischio infrastrutturale. Infine, sono state eseguite attività di approfondimento delle misure di spostamento con dati CSK/CSG.

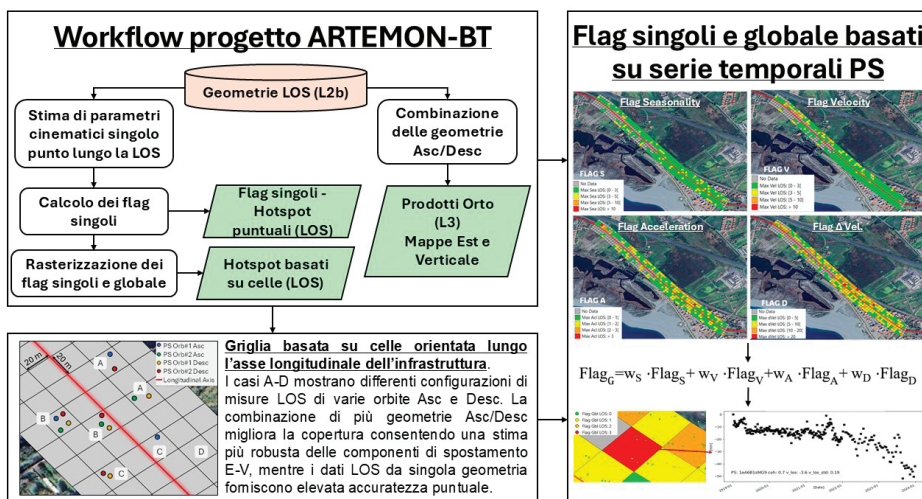


Figura 1 - Workflow ed esempio di applicazione del progetto ARTEMON-BT su infrastruttura di trasporto stradale. Progetto ARTEMON-BT realizzato utilizzando prodotti COSMO-SkyMed® dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), forniti sotto licenza d'uso da ASI.



# Rheticus® Safeway: sistema Web-GIS automatico per la reportistica e l'analisi delle infrastrutture basate su dati SAR (Interferometria SAR Multi-Temporale)

Anita Zingaro<sup>1</sup>, Carmelo Maria Fabiano<sup>1</sup>, Corrado Pisani<sup>1</sup>, Flavio D'Ippolito<sup>1</sup>, Marina Zingaro<sup>1</sup>, Michele Antonicelli<sup>1</sup>, Raffaele Borrelli<sup>1</sup>, Sergio Samarelli<sup>1</sup>, Teresa Fazio<sup>1</sup>, Vincenzo Barbieri<sup>1</sup>, Vincenzo Laurino<sup>1</sup>, Vincenzo Massimi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Planetek Italia, Bari, Italia, [massimi@planetek.it](mailto:massimi@planetek.it)

La piattaforma Web-GIS, presentata in questo lavoro, è stata sviluppata nell'ambito del bando a cascata "SARA-SAR", parte del progetto PNRR RETURN - TS-2, con l'obiettivo di realizzare una piattaforma operativa per il monitoraggio avanzato delle infrastrutture di trasporto mediante tecniche multi-temporali InSAR (MT-InSAR). Il sistema WebGIS implementato integra erende accessibili i prodotti di deformazione derivati dall'elaborazione interferometrica, trasformando dataset satellitari complessi in informazioni geo-analitiche immediatamente utilizzabili da enti gestori e operatori tecnici. Basata su tecnologie open-source, la piattaforma ospita un database spaziale centralizzato, contenente gli output generati dalle procedure di classificazione delle infrastrutture sviluppate dal gruppo di lavoro del progetto RETURN: tassi di spostamento lungo la LOS, velocità orizzontali e verticali, massime accelerazioni e altri indicatori utili alla diagnosi strutturale. Mappe tematiche, dashboard interattive e widget dedicati consentono di analizzare le dinamiche temporali dei movimenti del terreno, con particolare attenzione alle infrastrutture esposte a dissesto, subsidenza o instabilità correlate a fenomeni idro-geologici. Un elemento chiave del sistema è la classificazione automatizzata dei segmenti infrastrutturali tramite una classe di attenzione, elaborato combinando velocità, differenziali di velocità, accelerazioni e stagionalità dei target PS/DS. Le celle elementari sono tematizzate in quattro classi cromatiche, che evidenziano stabilità, necessità di monitoraggio o priorità di ispezione sul campo, in linea con le indicazioni ANSFISA. Tale

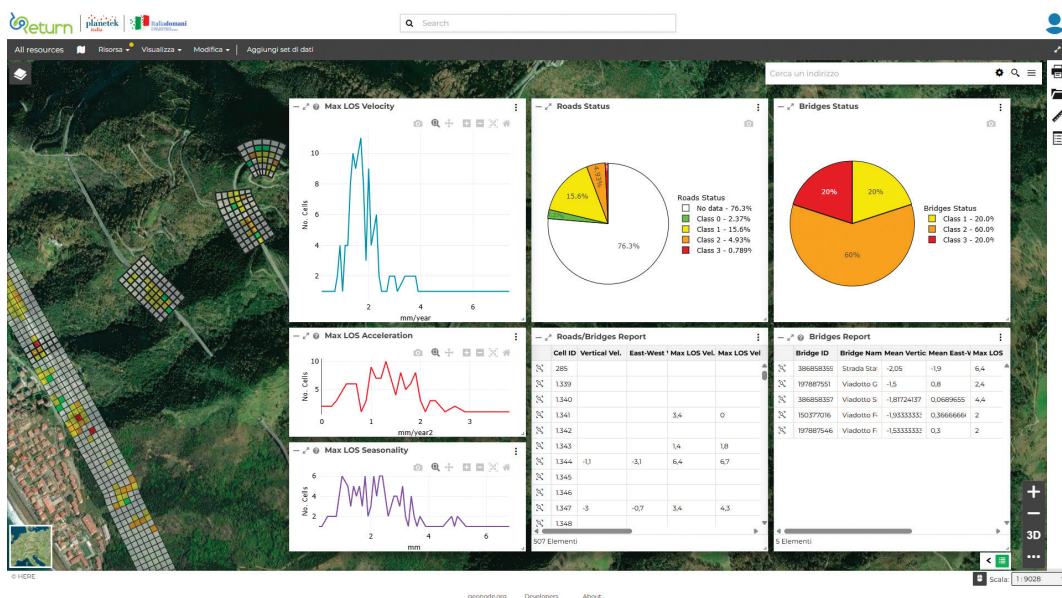


Figura 1 - interfaccia sistema Web-GIS Rheticus® Safeway.

criterio supporta la pianificazione efficiente delle risorse ispettive e la valutazione del rischio su scala territoriale. Un elemento chiave del sistema è la funzione di reporting automatico per singole infrastrutture, query avanzate basate sul livello di attenzione associato al ponte e ai segmenti di infrastruttura viaria o attributi amministrativi, e un'architettura modulare che ne consente l'estensione con ulteriori layer (carichi di traffico, dati climatici, sensori SHM). L'aderenza agli standard OGC garantisce interoperabilità e integrazione nelle infrastrutture di dati territoriali regionali e nazionali. Nel complesso, l'ambiente WebGIS rappresenta uno strumento scalabile, trasferibile e orientato al supporto decisionale, capace di contribuire alla manutenzione predittiva delle opere e alla resilienza delle reti di trasporto, in linea le esigenze degli operatori delle infrastrutture viarie.



# Valutazione strutturale di ponti critici attraverso prove di carico continue: il primo corridoio italiano per i trasporti eccezionali

Alessia Abbozzo<sup>1</sup>, Gabriele Cazzulani<sup>2</sup>, Loris Vincenzi<sup>3</sup>, Marco Savoia<sup>4</sup>, Michele Gervasio<sup>5</sup>, Agata Quattrone<sup>5</sup>, Lorenzo Hofer<sup>6</sup>, Mariano A. Zanini<sup>6</sup>, Carlo Pellegrino<sup>6</sup>, Marco di Prisco<sup>7</sup>

1 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Milano, Italia, [alessia.abbozzo@polimi.it](mailto:alessia.abbozzo@polimi.it)

2 Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Milano, Italia

3 Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari, Università di Modena e Reggio Emilia, Modena, Italia

4 Dipartimento Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Bologna, Italia

5 Almaviva, Roma, Italia

6 Dipartimento Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Università di Padova, Padova, Italia

7 Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano, Milano, Italia

L'invecchiamento delle infrastrutture e l'aumento della domanda di traffico rendono urgente la creazione di metodi efficienti per la valutazione continua dello stato di salute delle opere critiche. Gli autori propongono quindi una strategia innovativa: la realizzazione di un corridoio dedicato al transito di mezzi pesanti (Heavy Load Vehicles - HLV), volto a collegare i principali hub economici italiani. L'iniziativa è attualmente in fase di validazione come Proof of Concept (POC) nell'ambito del progetto Return. Il POC potrebbe costituire uno strumento di monitoraggio efficace qualora fossero disponibili: un censimento completo delle infrastrutture del corridoio; sistemi di monitoraggio strutturale permanenti (Structural Health Monitoring - SHM) sugli asset più critici e dati precisi sulla localizzazione degli HLV durante l'attraversamento dei ponti. La sincronizzazione tra traiettorie dei mezzi e misure SHM consentirebbe di effettuare prove di carico continue (Proof Load Testing - PLT), permettendo l'aggiornamento in tempo reale dell'affidabilità strutturale. A tale scopo, è stata sviluppata la piattaforma RETURN: la Control Room realizzata da Almaviva e basata su MOOVA, che integra dati strutturali, di SHM e di traffico per il monitoraggio continuo delle infrastrutture critiche. L'identificazione delle grandezze più significative da misurare e dei sensori più idonei da installare richiede l'esecuzione di ispezioni visive, prove diagnostiche e modelli agli elementi finiti (Finite Element Models - FEM). Questi strumenti consentono di formulare ipotesi preliminari su parametri e posizionamento dei sensori, verificate mediante PLT con strumentazione temporanea, fondamen-

tali per la comprensione del comportamento strutturale e la calibrazione del FEM.

Tale metodologia è stata applicata al ponte di Pizzighettone (Cremona, Italia), una struttura del 1971 composta da un impalcato a travi Gerber. L'analisi della documentazione progettuale e delle ispezioni eseguite ha evidenziato la necessità di ulteriori approfondimenti per completare le valutazioni di livello 1 e 2 previste dalle linee guida italiane, che hanno attribuito al ponte una classe di attenzione alta. È stato quindi sviluppato un modello FEM della prima delle cinque campate modulari, riproducendo la geometria rastremata delle sette travi, le fasi costruttive, gli effetti reologici e i profili reali dei cavi di precompressione, individuati tramite due indagini GPR. Il modello si è rivelato fondamentale per la definizione della configurazione SHM per il PLT. La prova di carico ha previsto il passaggio di due veicoli di massa pari a 44 t e 104 t, con l'installazione di accelerometri e sensori radar sulla prima campata e di un sistema Weigh-in-Motion (SiWIM) sulla seconda. Quest'ultimo ha rilevato in tempo reale su velocità, pesi d'asse e posizione dei mezzi, mentre radar e accelerometri hanno misurato frecce e vibrazioni strutturali. I risultati sono coerenti con le previsioni del FEM: durante il passaggio del veicolo da 104 t lo spostamento massimo misurato è stato pari a 0,6 cm, rispetto a un valore modellato che ottiene valori che si discostano dal valore misurato di un +/-8%, confermando l'affidabilità del modello. Sviluppi futuri prevedono l'integrazione tra dati FEM e PLT per l'aggiornamento continuo dell'affidabilità strutturale.



# Valutazione del rischio delle infrastrutture esposte a fenomeni naturali: il ruolo della robustezza strutturale

Alessio Rubino<sup>1</sup>, Valerio De Biagi<sup>1</sup>, Bernardino M. Chiaia<sup>1</sup>

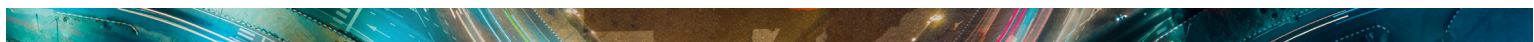
<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [alessio.rubino@polito.it](mailto:alessio.rubino@polito.it)

Le infrastrutture presenti sul territorio italiano risultano frequentemente esposte a eventi naturali estremi in grado di comprometterne l'integrità strutturale e la continuità operativa. Tale condizione rende evidente la necessità di metodologie affidabili per la valutazione e gestione dei rischi associati. Nel presente lavoro viene proposto un approccio semplificato, basato su classi ed operatori logici, per la classificazione del livello di rischio delle infrastrutture soggette a pericoli naturali, attraverso l'integrazione di tre componenti: pericolosità, vulnerabilità ed esposizione. La *Classe di Pericolosità* è definita in base alla zonizzazione territoriale, relativa al fenomeno considerato. La *Classe di Vulnerabilità* tiene conto sia della vulnerabilità fisica (strutturale) che quella funzionale dell'infrastruttura, quest'ultima è particolarmente rilevante nel caso di sistemi infrastrutturali a rete. La *Classe di Esposizione*, infine, considera le potenziali conseguenze del danno, in termini di vite umane, interruzione delle attività economiche (down-time), nonché l'impatto in termini culturali e sociali. Come risultato finale, la metodologia consente una classificazione gerarchica del livello di rischio delle infrastrutture site nel territorio di riferimento, articolata su una scala a cinque livelli (alto, medio-alto, medio, medio-basso, basso). Lo scopo applicativo finale è quello di fornire un supporto operativo ai *policymakers* e ai gestori delle infrastrutture, nella definizione delle priorità di intervento e nell'allocazione efficiente delle risorse destinate alla mitigazione del rischio.

In questo contesto, la robustezza strutturale assume un ruolo centrale nella determinazione della resilienza complessiva del sistema, in quanto strettamente connessa alla propensione di una costruzione a subire danni sotto l'azione di carichi estremi. Questo concetto è stato ampiamente trattato nella letteratura scientifica, con

riferimento ai fenomeni di collasso progressivo e collasso sproporzionato, nonché alle corrispondenti strategie progettuali, quali il Metodo della Resistenza Locale (*Specific Local Resistance*, SLR), la Redistribuzione dei Carichi (*Alternate Load Path*, ALP) e la segmentazione strutturale (*Segmentation*). Nell'ambito della valutazione dei percorsi alternativi dei carichi, il presente studio contribuisce all'avanzamento dello stato dell'arte mediante l'applicazione di un modello analitico basato sulla meccanica della frattura, volto a descrivere la capacità degli elementi strutturali in calcestruzzo armato di ridistribuire le azioni verso la struttura circostante, in condizioni di carico estremo. Il modello proposto è in grado di cogliere il comportamento non lineare di tali componenti, caratterizzato dalla fessurazione del calcestruzzo, dallo snervamento e dalla frattura delle armature in acciaio, nonché dallo sviluppo di forze assiali di compressione e trazione associate, rispettivamente, ai meccanismi ad arco ed al regime catenario.

Quest'ultimo risulta di particolare interesse per il conferimento di robustezza allo schema strutturale, in quanto rappresenta l'ultima linea di difesa del sistema prima del collasso globale. Il principale punto di forza del modello risiede nella sua capacità di interpretare i fenomeni principali della risposta strutturale attraverso un approccio fisico unificato, consentendo una valutazione analitica e quantitativa della capacità di redistribuzione dei carichi del sistema strutturale. In prospettiva, il modello è concepito per la sua integrazione in modelli numerici più avanzati, definiti a livello di struttura globale, contribuendo così a migliorare la valutazione della robustezza di sistemi strutturali in scala reale, tema tuttora oggetto di dibattito nella letteratura scientifica.





# Manutenzione predittiva di ponti a struttura metallica soggetti a fatica e degrado

Aldo Milone<sup>1</sup>, Alessandro Prota<sup>2</sup>, Raffaele Landolfo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli "Federico II", Napoli, Italia, [aldo.milone@unina.it](mailto:aldo.milone@unina.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli "Federico II", Napoli, Italia

Nel presente lavoro è illustrata una procedura analitica per la manutenzione predittiva di ponti a struttura metallica, i quali sono - in virtù della tipica destinazione d'uso - spesso situati in ambienti aggressivi e soggetti a carichi ciclici rilevanti durante la loro vita di servizio. Ciò li espone a problematiche di fatica e corrosione, per l'analisi delle quali è stata sviluppata una metodologia analitica.

Tale metodologia, che si cala nel contesto della performance-based engineering, è declinata sia in termini semi-probabilistici che puramente probabilistici. Essa consente, sulla base di poche informazioni derivanti dalla conoscenza e dall'analisi strutturale delle opere (ad esempio, classe e volume di traffico attesi, spettri di carico, tipologie di sezioni esposte, classi di corrosività) di stimare il tempo ottimale di intervento per tali infrastrutture critiche sulla base di alcuni indicatori sintetici (danno cumulato  $D$ , *reliability index*  $\beta$  a fine vita, livello di corrosione "critica"  $\eta^*$ )

e valutare l'efficacia di interventi di retrofit a basso impatto orientati al contrasto del degrado.

L'applicazione di tale metodo è presentata con riferimento al Ponte Cadore, infrastruttura critica a struttura metallica di media luce (270 m) afferente al Proof of Concept POC2 - SS51 "Alemagna". In particolare, a valle di un'accurata analisi delle informazioni tipologiche-strutturali disponibili è stata eseguita una modellazione numerica di tale opera, cui è seguita l'applicazione della procedura proposta per lo studio degli scenari ottimali di intervento - sia in termini di tempo ottimale di retrofit, sia in termini di tecnica innovativa adottata (*on-site shoot peening* "OSSP"). Sulla base dei risultati ottenuti, è stato dimostrato come la - seppur modesta - progressione del danno dovuto a fatica e corrosione nei dettagli critici del Ponte Cadore sia efficacemente contrastabile tramite retrofit locale e a basso impatto, esitando in un'affidabilità a fine vita che è comparabile con quella di una struttura esente da problemi di degrado ambientale.

# Analisi multirischio delle reti stradali montane

Francesca da Porto<sup>1</sup>, Luca Badin<sup>1</sup>, Elisa Saler<sup>1</sup>, Andrea Gennaro<sup>1</sup>, Marco Donà<sup>1</sup>, Ascanio Rosi<sup>1</sup>, Daniele P. Viero<sup>2</sup>, Carlo Gregoret<sup>3</sup>, Leonardo Maria Giannini<sup>4</sup>, Fabio Rollo<sup>5</sup>, Carlo Esposito<sup>4</sup>, Diego Di Martire<sup>6</sup>, Silvio Coda<sup>6</sup>, Giuseppe Bausilio<sup>6</sup>, Giulia La Porta<sup>7</sup>, Marina Pirulli<sup>7</sup>, Pier Francesco Giordano<sup>8</sup>, Riccardo Liuzzo<sup>8</sup>, Maria Pina Limongelli<sup>8</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova, Padova, Italia, [luca.badin@unipd.it](mailto:luca.badin@unipd.it)

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova, Padova, Italia

<sup>3</sup> Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Università di Padova, Padova, Italia

<sup>4</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Roma "La Sapienza", Roma, Italia

<sup>5</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", Roma, Italia

<sup>6</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e Risorse, Università di Napoli "Federico II", Napoli, Italia

<sup>7</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino, Italia

<sup>8</sup> Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, Milano, Italia

La gestione degli scenari di pericolo, che interessano le infrastrutture di trasporto, rappresenta una sfida rilevante dal punto di vista sociale ed economico. Tali infrastrutture sono essenziali per la mobilità, ma risultano spesso vulnerabili a molteplici pericoli naturali, soprattutto nelle aree montane, dove la complessità morfologica riduce la ridondanza delle reti e limita sia la progettazione sia la gestione delle emergenze.

Il Proof of Concept PoC1-Cadore affronta queste criticità attraverso lo sviluppo di un innovativo framework multidisciplinare che integra la quantificazione dei pericoli naturali, l'identificazione degli elementi critici della rete di trasporto e la valutazione degli impatti sulle infrastrutture. Lo studio è applicato a una rete stradale alpina di circa 120 km, situata in un'area esposta a rischio sismico, alluvionale, da frana e colate detritiche. Gli obiettivi includono la quantificazione della pericolosità, l'individuazione dei tratti e dei nodi critici, l'analisi del danno atteso degli impatti, nonché degli effetti di chiusure parziali o totali della rete. La metodologia di valutazione del rischio si basa su tecniche GIS che rappresentano in modo coerente le componenti di pericolosità, esposizione e vulnerabilità, adottando un approccio per scenari per periodi di ritorno significativi. Il framework consente l'integrazione di modelli e strumenti, sviluppati in diversi ambiti disciplinari, e considera anche eventi a cascata, come le frane sismo-indotte. Particolare atten-

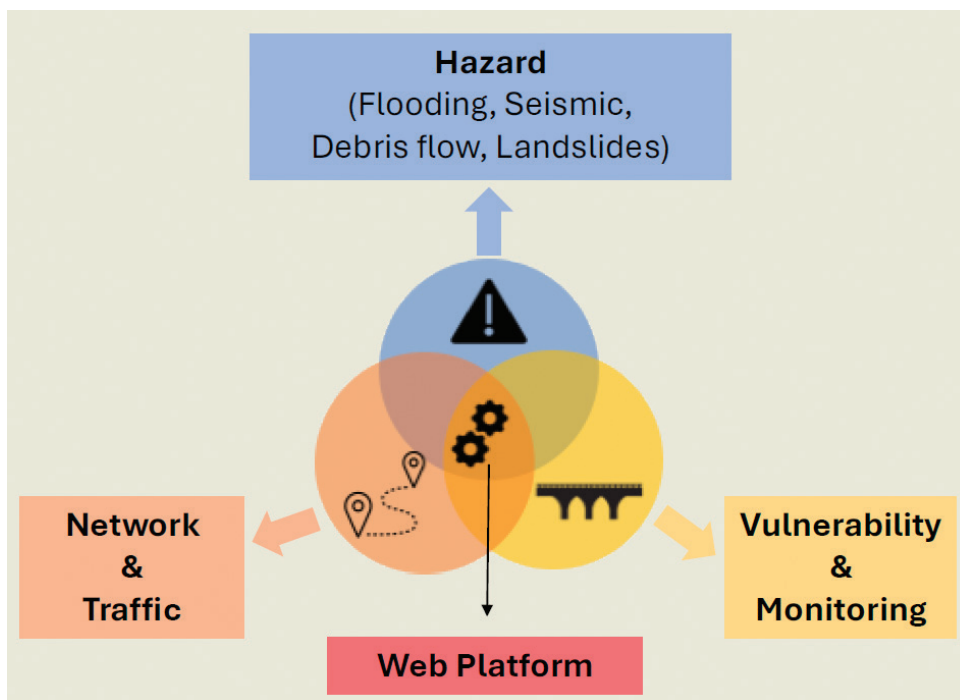


Figura 1 - Integrazione delle componenti del rischio valutate attraverso l'analisi basata su GIS.

zione è rivolta a ponti e viadotti, valutati tramite curve di fragilità e tecniche di monitoraggio satellitare InSAR. I risultati dimostrano il potenziale applicativo dei modelli sviluppati nel progetto RETURN e forniscono un supporto operativo per la gestione dei rischi e il miglioramento della resilienza delle infrastrutture di trasporto, con possibilità di estensione ad altri contesti territoriali.

# Simulazione multirischio per la resilienza delle infrastrutture ferroviarie

Luisa Lavalle<sup>1</sup>, Daniele Fava<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Analisi E Modelli per le Infrastrutture Critiche e i Servizi essenziali (TERIN-ICER-ICS), ENEA, Roma, Italia, [luisa.lavalle@enea.it](mailto:luisa.lavalle@enea.it)

I pericoli legati al clima (alluvioni, terremoti, frane e raffiche di vento estremo) rappresentano una minaccia crescente per tutte le infrastrutture critiche, incluse quelle ferroviarie. Tali eventi possono generare danni ai singoli componenti e interruzioni a cascata, amplificate dall'elevato livello di interconnessione dei sistemi. Le valutazioni di rischio tradizionali, spesso basate su singoli pericoli considerati isolatamente, non riescono a cogliere questa complessità. In un contesto di risorse finanziarie limitate, diventa quindi essenziale concentrare gli sforzi operativi sulle aree e sui componenti più esposti, considerando scenari multi-hazard e gli effetti a cascata in una visione sistemica.

Questo lavoro presenta un framework avanzato e modulare di simulazione per la valutazione della resilienza ferroviaria, il cui flusso di lavoro è illustrato in Fig. 1. Questo integra i simulatori di dominio con un approccio multirischio, consentendo un'analisi più completa dei guasti a cascata e delle interruzioni a livello di sistema.

Il cuore del modello ferroviario è OpenTrack, un simulatore commerciale ampiamente utilizzato, in grado di rappresentare in dettaglio l'esercizio ferroviario sulla base delle caratteristiche infrastrutturali, delle regole di segnalamento e del comportamento dinamico dei treni. Sebbene sviluppato per la pianificazione e l'analisi di capacità, OpenTrack risulta adatto a studi di resilienza se opportunamente esteso. Il framework potenzia il simulatore mediante l'interfacciamento con software esterni che consentono l'iniezione controllata dei guasti, basata su modelli di fragilità riconosciuti e validati su dati di danno reali, sulla modellazione dinamica degli eventi naturali e sull'analisi dei meccanismi di pro-

pagazione dei guasti, tradotti nella semantica operativa del simulatore.

La sperimentazione è stata condotta sia in scenari all-hazard sia in casi specifici, tra cui caduta massi, inondazione costiera ed esondazione fluviale. I risultati mostrano come, con adattamenti relativamente contenuti, alcuni sistemi di simulazione commerciali già in uso possano essere trasformati in efficaci strumenti per la valutazione della resilienza. Gli impatti sull'infrastruttura sono misurati tramite indicatori operativi direttamente utilizzabili dai gestori, quali il numero di treni coinvolti, cancellati o limitati e i minuti complessivi di ritardo.

In un contesto di rischi climatici crescenti, ambienti di simulazione come quello proposto rappresentano un supporto strategico per gestire l'incertezza e orientare in modo informato le decisioni e gli investimenti sulla resilienza delle infrastrutture ferroviarie.

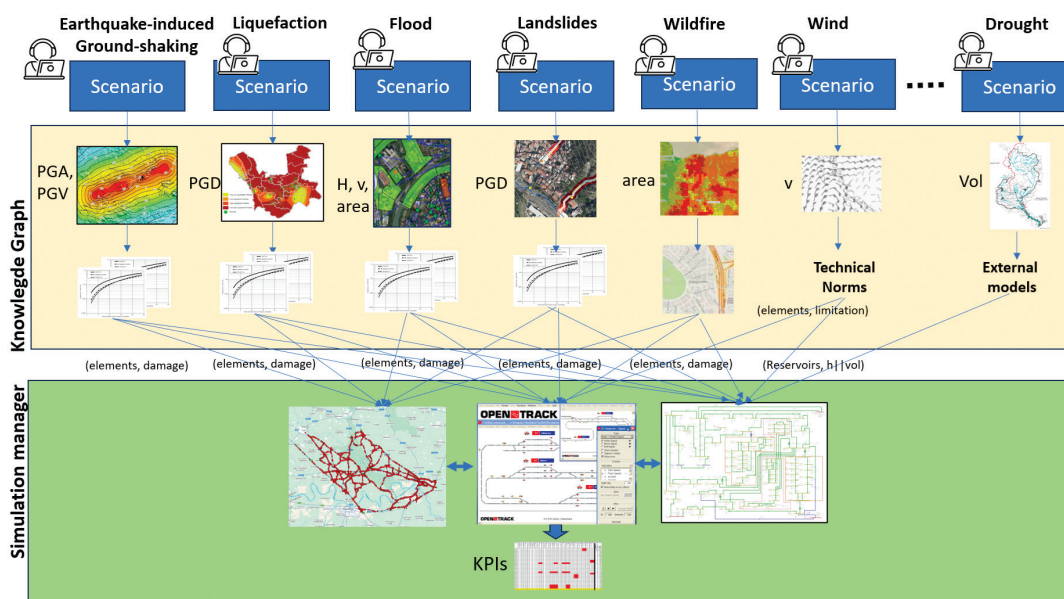


Figura 1 - Workflow dell'ambiente di simulazione.

# Il sistema di supporto alle decisioni per l'analisi di rischio dinamica nelle gallerie stradali

Davide Berardi<sup>1</sup>, Marta Galuppi<sup>1</sup>, Alessio De Angelis<sup>1</sup>, Mara Lombardi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Chimica, Materiali Ambiente, Sapienza, Università di Roma, Roma, Italia, [davide.berardi@uniroma1.it](mailto:davide.berardi@uniroma1.it)

Le gallerie stradali rappresentano un asset strategico delle infrastrutture di trasporto, la cui gestione della sicurezza risulta ancora prevalentemente fondata su approcci di tipo statico e su verifiche di conformità condotte principalmente in fase di progettazione. In condizioni di esercizio, tuttavia, il livello di rischio associato a tali infrastrutture evolve in funzione di molteplici fattori dinamici, tra cui le condizioni di traffico, le variabili ambientali, lo stato di efficienza e affidabilità dei sistemi impiantistici e tecnologici installati (ventilazione, illuminazione e impianti di sicurezza). Il presente lavoro propone un framework di *Decision Support System* (DSS), sviluppato nell'ambito del progetto RETURN, volto all'implementazione di un approccio di analisi del rischio dinamica. Tale framework consente l'aggiornamento continuo del rischio residuo in relazione alla variazione delle condizioni al contorno e dei dati di input, integrando indicatori di rischio e di resilienza dell'asset infrastrutturale. Il DSS fornisce pertanto un supporto decisionale ai gestori e agli operatori locali, favorendo una gestione più consapevole, adattiva e proattiva delle condizioni di sicurezza in esercizio. L'architettura proposta è incentrata su un nucleo di *dynamic risk engine*, all'interno del quale convergono modelli fisici e analitici per la simulazione dei fenomeni incidentali e la valutazione delle condizioni di sicurezza. In particolare, il sistema integra modelli di propagazione dell'incendio e dei fumi, algoritmi per la stima delle condizioni di vivibilità, moduli di traffico per la ricostruzione delle portate veicolari e delle configurazioni di coda, nonché procedure di aggiornamento dinamico delle probabilità di innesco. L'acquisizione e il campionamento dei dati avvengono in modo continuo, con frequenze di aggiornamento coerenti con le latenze dei sistemi di misura e di trasmissione. I risultati dell'analisi sono restituiti attraverso un sistema di visualizzazione multilivello, che include indicatori sintetici di criticità, soglie di allerta, curve temporali evolutive e raccomandazioni operative. Tali raccomandazioni comprendono, a titolo esemplificativo, strategie di ventilazione, scenari di messaggistica e illuminazione per l'evacuazione, nonché l'individuazione di percorsi di esodo sicuri. Il sistema prevede inoltre una modalità di gestione articolata su livelli (I-III), calibrata in funzione delle specifiche condizio-

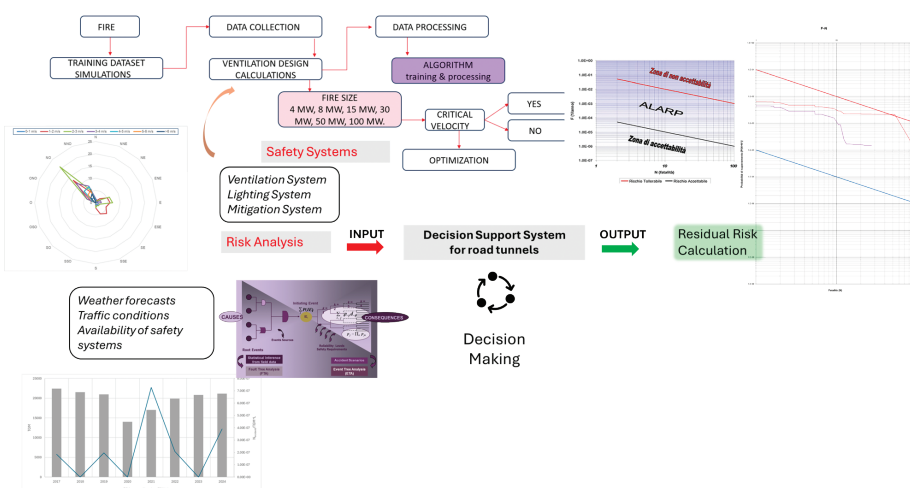


Figura 1 - Sistema di supporto alle decisioni: applicazione all'asset galleria dell'infrastruttura stradale.

ni operative e di rischio. Il *Decision Support System* (DSS) consente di rendere operativi i criteri di accettabilità del rischio in coerenza con la Direttiva 2004/54/CE e con il D.lgs. 264/2006, adottando l'approccio ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*). In tale contesto, i requisiti di sicurezza vengono tradotti e aggiornati mediante metriche dinamiche, oggettivamente verificabili, che permettono l'adattamento delle decisioni operative sulla base di una valutazione del rischio aggiornata. La validazione del framework si basa su evidenze sperimentali e sull'impiego di dataset derivanti da prove in scala reale, supportate da modellazione CFD, consentendo di calibrare le scelte decisionali in relazione allo scenario specifico. Un'applicazione rappresentativa, riferita a uno scenario di incendio, dimostra la capacità del sistema di identificare configurazioni operative critiche e di anticipare il superamento di soglie di sicurezza (ad esempio temperatura e concentrazione di CO) con un preavviso dell'ordine di alcuni minuti. Tale capacità permette di strutturare il workflow di risposta mediante la pianificazione del recupero in caso di collasso funzionale e la minimizzazione dell'impatto sulla rete infrastrutturale. Una sintesi grafica dei risultati di progetto è riportata in Fig. 1.



# Innovazione e Industrializzazione nella Rigenerazione delle Infrastrutture: l'Applicazione alla Galleria Poderuzzo

Carlo Alessio<sup>1</sup>, Lapo Baccolini<sup>1</sup>, Andrea Poli<sup>1</sup>, Marilisa Conte<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gruppo Autostrade per l'Italia S.p.A, Roma, Italia, [lapo.baccolini@tecneautostrade.it](mailto:lapo.baccolini@tecneautostrade.it)

L'avanzato stato di servizio della rete autostradale italiana, realizzata in gran parte prima degli anni '70, ha reso necessaria la sistematica indagine e ispezione dei rivestimenti delle gallerie, finalizzata a identificarne possibili criticità. I limiti tecnologici propri dell'epoca di costruzione e i conseguenti difetti costruttivi, combinati con gli standard progettuali storici, hanno accelerato i processi di degrado dei materiali, con potenziale riduzione nel lungo termine della funzionalità delle opere.

Al fine di intercettare e risolvere tale fenomeno, il Gruppo Autostrade per l'Italia ha sviluppato e applicato sulle gallerie della rete la Tunnel Renewal Strategy (TRS), un approccio ingegneristico mirato alla rigenerazione strutturale delle gallerie. La strategia si basa su otto diverse soluzioni tipologiche di intervento, accomunate dalla minimizzazione dello spessore di rivestimento esistente, dall'inserimento di uno strato di impermeabilizzazione e di un nuovo rivestimento interno in materiali ad elevate prestazioni.

La selezione della soluzione tipologica ottimale avviene tramite un processo decisionale multicriterio, valutando non solo gli aspetti tecnici, ma anche i principi di sostenibilità ambientale, le aspettative di durabilità e manutenibilità, così come i requisiti tecnologici per garantire la continuità del servizio su infrastrutture strategiche per il paese. Oggi la TRS è parte integrante della strategia di gestione infrastrutturale del Gruppo e, con oltre 40 progetti completati, si conferma una strategia scalabile ed efficace per l'ammodernamento delle gallerie.

Il presente lavoro illustra l'applicazione pilota di uno dei tipologici di intervento sulla Galleria Poderuzzo (Autostrada A1, Barberino di Mugello), che ha visto la collaborazione tra Autostrade per l'Italia, Tecne, Amplia In-

frastructures e Paver. L'innovazione tecnologica risiede nell'impiego di un nuovo rivestimento composto da conci prefabbricati in calcestruzzo armato ad alte prestazioni. La soluzione, brevettata nell'ottobre 2025, si aggiunge alle soluzioni tradizionali di rivestimenti in calcestruzzo gettato in opera, offrendo significativi vantaggi in termini di:

- **Sicurezza e Qualità:** la produzione industrializzata in stabilimento garantisce un controllo rigoroso sui materiali e riduce i rischi per gli operatori in cantiere.
- **Efficienza Temporale:** grazie alla posa in parallelo degli elementi modulari, è possibile minimizzare l'impatto sul traffico e accelerare i tempi di esecuzione.
- **Durabilità:** il sistema è progettato per garantire una "vita nominale" di 50 anni, risolvendo contestualmente i difetti idraulici mediante l'integrazione di membrane impermeabilizzanti e sistemi di drenaggio.

La realizzazione del nuovo rivestimento ha previsto il montaggio di 320 lastre in zona piedritto e 320 conci di calotta. L'accuratezza della posa è stata assicurata dall'uso di una stazione totalmente robotizzata e di una speciale attrezzatura idraulica di sollevamento, progettata appositamente per evitare la presenza di personale sotto carichi sospesi.

I risultati ottenuti sulla Galleria Poderuzzo dimostrano l'efficacia del sistema: l'ammodernamento integrale di 220 metri di tunnel è stato completato in soli 90 giorni, raggiungendo avanzamenti produttivi fino a 12-14 metri al giorno. Questo caso studio conferma come i rivestimenti prefabbricati rappresentino una valida alternativa per il rinnovo delle infrastrutture sotterranee, coniugando sostenibilità ambientale, prestazioni strutturali e rapidità d'intervento.



# Safety & Operations Training Hub: training immersivo per infrastrutture critiche

Francesca Maria Ugliotti<sup>1</sup>, Muhammad Daud<sup>2</sup>, Maria Castiglione<sup>3</sup>, Michele Torregrossa<sup>3</sup>

<sup>1</sup> DISEG, Politecnico di Torino, Torino, Italia, [francesca.ugliotti@polito.it](mailto:francesca.ugliotti@polito.it)

<sup>2</sup> DISEG, Politecnico di Torino, Torino, Italia

<sup>3</sup> Ingegneria, Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italia

La crescente complessità strutturale e operativa delle infrastrutture critiche richiede strumenti formativi capaci di integrare comprensione dei processi, consapevolezza del rischio e affidabilità procedurale. In questo contesto, il *Safety & Operations Training Hub* propone un prototipo di Serious Game immersivo, sviluppato per la simulazione di un impianto di trattamento delle acque reflue, con l'obiettivo di verificare l'efficacia della realtà virtuale come supporto avanzato alla formazione tecnica. L'applicazione integra modellazione BIM, tecnologie VR e moduli interattivi basati su Large Language Models per trasformare contenuti eterogenei in percorsi formativi personalizzati. L'architettura del sistema si articola in una pipeline multi-layer che integra fonti di dati eterogenee, modelli digitali, sistemi di interazione e servizi intelligenti, con l'obiettivo di trasformare informazioni tecniche e documentali in un ambiente virtuale navigabile, coerente con l'infrastruttura reale e arricchito da funzionalità avanzate di supporto all'utente. Le procedure sono convertite in workflow digitali verificabili, permettendo la simulazione di attività di controllo, manutenzione e monitoraggio, oltre alla valutazione delle condizioni operative e al riconoscimento dei principali rischi dell'impianto, tra cui pericoli biologici, esplosioni da biogas e rischi chimici. L'esperienza formativa è strutturata su tre profili utente:

visitatore, operatore e ispettore. I visitatori seguono un percorso narrativo che illustra le principali fasi del trattamento, mentre gli operatori svolgono attività tecniche tramite checklists interattive, verifica dei parametri, identificazione di anomalie e accesso a video-procedure contestuali. Gli ispettori, infine, dispongono di strumenti dedicati alla verifica della conformità, delle condizioni di sicurezza e della documentazione associata. Tutti i profili condividono una storyline comune articolata lungo la linea acque, la linea fanghi o un percorso integrato, con la possibilità di deviazioni generate da scenari di pericolo. Il sistema registra le interazioni degli utenti, calcola gli indicatori di performance specifici per ciascun ruolo e presenta un debriefing finale che sintetizza copertura del percorso, attività svolte, rischi affrontati e risultati formativi. I risultati mostrano come l'integrazione di tecnologie immersive e interazioni AI migliori la consapevolezza del rischio, supporti l'affidabilità procedurale, ampli l'accessibilità a aree operative complesse e favorisca una valutazione oggettiva dell'apprendimento. Il progetto evidenzia inoltre la trasferibilità del framework ad altre infrastrutture, contribuendo a un modello di formazione più sicuro, coinvolgente e resiliente per il settore idrico. Una rappresentazione dei risultati del progetto è contenuta in Fig. 1.

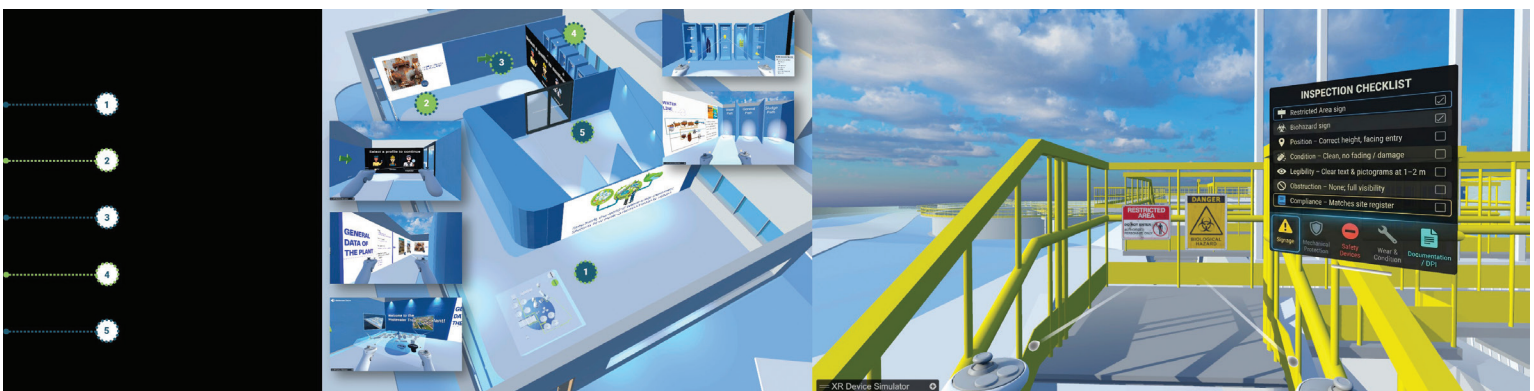


Figura 1 - Safety & Operations Training Hub





## Convention “Sicurezza delle Infrastrutture” Torino - 15-16 gennaio 2026

### COMITATO SCIENTIFICO

Francesco Ballio - Politecnico di Milano  
Francesca Bozzano - Università La Sapienza di Roma  
Domenico Calcaterra - Università degli Studi di Napoli Federico II  
Gabriele Cazzulani - Politecnico di Milano  
Pierluigi Claps - Politecnico di Torino  
Pierfrancesco Dellino - Università di Bari  
Marco Di Prisco - Politecnico di Milano  
Lorenzo Hofer - Università di Padova  
Mara Lombardi - Università La Sapienza di Roma  
Paola Mazzoglio - Politecnico di Torino  
Alberto Montanari - Università di Bologna  
Francesco Napolitano - Università La Sapienza di Roma  
Carlo Pellegrino - Università di Padova  
Andrea Prota - Università degli Studi di Napoli Federico II  
Giuseppe Quaranta - Università La Sapienza di Roma  
Marco Savoia - Università di Bologna

### COMITATO ORGANIZZATORE

Gabriele Freni - Università degli Studi di Enna “Kore”  
Alessia Abbozzo - Politecnico di Milano  
Giuseppe Cammarata - Engineering Ingegneria Informatica S.p.A.  
David Javier Castro Rodriguez - Politecnico di Torino  
Elisabetta Colucci - Politecnico di Torino  
Giulia Evangelista - Politecnico di Torino  
Luisa Lavalle - ENEA  
Gianmarco Piola - Fondazione Piemonte Innova  
Giacomo Titti - Università di Bologna

### COORDINAMENTO EDITORIALE

Paola Mazzoglio - Politecnico di Torino

### CONTATTI

segreteria@fondazionereturn.it

[www.fondazionereturn.it](http://www.fondazionereturn.it)

