

Eventi estremi e Infrastrutture Critiche: Strategie per la Resilienza

Bando per piani di sviluppo su tematiche strategiche, sviluppati in collaborazione tra le associazioni nell'ambito della Strategia di Specializzazione Intelligente dell'Emilia-Romagna

BANDO INTER CLUST-ER

Rev_3 - Aprile 2026

Sommario

Introduzione	4
Il contesto del sistema di gestione delle emergenze.....	6
L'ordinamento regionale della Protezione Civile in Emilia-Romagna.....	7
La cooperazione con il servizio Vigili del Fuoco Emilia-Romagna.....	9
Criticità del sistema di gestione delle emergenze.....	10
Obiettivi e Strategie operative	12
Le analisi e le simulazioni per il monitoraggio pre-crisi.....	15
Soluzioni esistenti e in uso nei sistemi di monitoraggio, potenzialità e criticità.....	16
Soluzioni di sistema integrate e rivolte ad operare in sinergia con i sistemi di analisi emergenziale.....	17
Lo strumento PRE-EMERGE, un esempio di sistema di monitoraggio ambientale predittivo	18
CITTADIN-AI, un monitoraggio più capillare che nasce dalla comunità	21
La comunicazione: verso Infrastrutture ICT resilienti	23
La <i>mesh</i> come una filosofia di design.....	24
Basso consumo energetico come resilienza temporale	25
Eterogeneità: una leva strategica.....	26
Azioni di mappatura e generazione di scenari.....	26
Strategie e ipotesi operative per affrontare l'emergenza.....	27
Criteri per la classificazione delle infrastrutture sensibili	29
Individuazione dell'infrastruttura viaria sensibile.....	29
Individuazione di classi di edifici sensibili	29
Censimento delle infrastrutture e verifica rispetto al PGRA	30
Supporto alla gerarchizzazione delle infrastrutture in ottica di resilienza.....	31
Conclusioni.....	34

Negli ultimi anni, abbiamo visto come fenomeni climatici eccezionali, un tempo rari, siano diventati la nuova normalità. Alluvioni, frane, interruzioni dei servizi essenziali: ogni crisi ci ricorda quanto siano fragili le nostre infrastrutture e quanto sia fondamentale il lavoro di chi, ogni giorno, si impegna per renderle più sicure, resilienti e sostenibili.

Come sottolinea nel contesto dell'“Accordo quadro tra Regione e Università di Bologna per affrontare insieme il cambiamento climatico” il professor Giovanni Molari, Rettore dell'Università di Bologna, la resilienza non può essere più vista come solo una questione di tecnologie o di procedure: “La rapida evoluzione della crisi climatica e la vulnerabilità dei nostri territori ai rischi naturali richiedono nuove strategie e nuove risposte”¹. È una visione collettiva, una responsabilità condivisa tra istituzioni, imprese, comunità scientifica e cittadini. È la capacità di imparare dagli eventi, di integrare conoscenze e competenze, di innovare e di collaborare oltre i confini dei singoli settori.

La stessa AIIC (Associazione Italiana Esperti in Infrastrutture Critiche), nel rapporto “Resilienza delle infrastrutture critiche e cambiamenti climatici”², evidenzia che “la resilienza delle infrastrutture critiche non può essere affidata a un singolo approccio o a una soluzione tecnologica isolata. La complessità e la frequenza crescente degli eventi estremi impongono una visione integrata, in cui la conoscenza approfondita delle reti e la capacità di valutare criticità e priorità attraverso strumenti avanzati e di facile lettura diventano elementi imprescindibili per la pianificazione e la gestione del rischio”.

¹ <https://www.regione.emilia-romagna.it/notizie/2025/marzo/difesa-del-territorio-per-unemilia-romagna-piu-sicura-e-resiliente-accordo-quadro-tra-regione-e-universita-di-bologna-per-affrontare-insieme-il-cambiamento-climatico>

² Resilienza delle infrastrutture critiche e cambiamenti climatici. Stefanini, A., Bari, S., Bertocchi, G., Bologna, S., Carrozzi, L. Cipriani, G., Dursi, E., Franchina, L., Fumagalli, A.A., & Trallesi, A. (2024).

Introduzione

La gestione delle infrastrutture critiche in caso di eventi estremi rappresenta una sfida strategica per la sicurezza regionale, la stabilità economica e la tutela della vita quotidiana.

Negli ultimi anni, la Regione Emilia-Romagna ha registrato un aumento significativo degli eventi climatici estremi. Le alluvioni del 2023 in Romagna e del 2024 nel Parmense/Reggiano hanno evidenziato la vulnerabilità delle infrastrutture critiche a dissesti idrogeologici quali frane, piene improvvise e allagamenti urbani, con impatti rilevanti sull'accessibilità territoriale e sulla continuità dei servizi di emergenza.

Questi fenomeni, che un tempo erano considerati rari, stanno diventando la nuova normalità, ponendo sfide sempre più complesse per la gestione delle infrastrutture regionali. Tra queste, la tutela delle infrastrutture critiche è prioritaria: una loro compromissione può generare effetti a cascata e indebolire la tenuta del sistema socioeconomico locale.

L'imprevedibilità degli eventi estremi richiede un approccio integrato basato su analisi preventiva dei rischi, piani di emergenza, coordinamento tra enti pubblici e privati e tecnologie avanzate per il monitoraggio e la risposta, richiedendo un approccio che metta al centro la resilienza e la sostenibilità ambientale, unitamente ad una profonda conoscenza delle infrastrutture ad oggi esistenti.

È fondamentale rafforzare la capacità di monitoraggio dei dissesti passati, attuali e futuri, nonché dell'attività dei corsi d'acqua e del loro comportamento in scenari di emergenza, con particolare attenzione a frane, piene e allagamenti. Un altro aspetto cruciale è la necessità di mantenere attivi i servizi essenziali, evitare l'abbandono del territorio, rafforzare la resilienza delle infrastrutture digitali e sostenere le economie locali. La resilienza diventa un obiettivo strategico: progettare infrastrutture sicure e flessibili, capaci di resistere e ripristinare rapidamente le funzionalità in caso di crisi. L'obiettivo al centro della strategia di sviluppo integrata dei quattro Clust-ER regionali (coinvolti BUILD, INNOVATE, TOURISM, URBAN), è sviluppare soluzioni innovative per garantire sicurezza, continuità operativa e integrazione delle tecnologie emergenti nelle infrastrutture critiche. I Clust-ER rappresentano rispettivamente i settori dell'edilizia, dell'innovazione nei servizi, del turismo e dell'economia urbana.

Il progetto Extreme – strategie e soluzioni per la resilienza delle infrastrutture critiche, finanziato dalla Regione Emilia-Romagna come progetto inter cluster, mira a sviluppare soluzioni innovative per aumentare la resilienza delle infrastrutture della Regione Emilia-Romagna, con un focus su logistica e mobilità. L'obiettivo è ridurre i rischi fisici e digitali, garantire continuità operativa e favorire l'integrazione con tecnologie emergenti.

Le attività includono:

- Monitoraggio avanzato e manutenzione predittiva delle infrastrutture critiche;
- Sviluppo di piani di emergenza e gestione del rischio integrati con strumenti digitali;
- Promozione della smart mobility e dell'uso di infrastrutture verdi e blu per mitigare il rischio idrogeologico;
- Coinvolgimento di stakeholder pubblici e privati per favorire la collaborazione e lo sviluppo di progetti finanziabili a livello europeo;
- Attività di comunicazione e formazione per diffondere best practices e sensibilizzare gli operatori del settore.

Il contesto del sistema di gestione delle emergenze

La gestione delle emergenze rappresenta il fondamento su cui si costruisce la resilienza di un territorio. Comprendere il contesto istituzionale, normativo e operativo del sistema di protezione civile è essenziale per affrontare con efficacia le sfide poste dagli eventi estremi. In questo contesto, è fondamentale analizzare la struttura e il funzionamento del sistema di gestione delle emergenze in Emilia-Romagna, evidenziando il ruolo delle diverse istituzioni coinvolte, le modalità di coordinamento e le principali criticità che caratterizzano la risposta alle crisi, così da individuare strategie efficaci per la tutela delle infrastrutture critiche e la sicurezza delle comunità.

A livello nazionale e, a cascata, a livello regionale e locale, l'organo maggiormente coinvolto nelle operazioni di intervento emergenziale e messa in sicurezza dei siti colpiti da crisi naturali o eventi estremi è la Protezione Civile.

La Protezione Civile in Italia trova la sua disciplina organica nel Decreto Legislativo 2 gennaio 2018, n. 1, che ha riordinato il precedente impianto normativo definendo in modo unitario: principi, finalità, struttura organizzativa e riparto delle competenze tra i diversi livelli istituzionali.

La Protezione Civile è una funzione pubblica esercitata da un sistema complesso di soggetti – statali, regionali e locali – che concorrono a garantire la salvaguardia della vita umana, l'integrità dei beni, degli insediamenti e dell'ambiente attraverso attività coordinate di previsione, prevenzione, mitigazione, preparazione, gestione dell'emergenza e superamento delle situazioni emergenziali. La normativa fornisce una distinzione puntuale tra previsione, allertamento, pianificazione e gestione delle emergenze, attribuendo a ciascuna un preciso valore giuridico e operativo. La previsione comprende le attività scientifiche volte alla identificazione delle fonti di rischio e alla valutazione della loro intensità e probabilità; l'allertamento costituisce invece il processo mediante il quale le autorità competenti stabiliscono livelli di attenzione e specifiche misure di attivazione sulla base degli scenari forniti dai Centri funzionali. La pianificazione ha carattere preventivo e programmatico e individua modelli di intervento, funzioni di supporto, catene decisionali e disponibilità di risorse da mettere in campo; la gestione dell'emergenza è il complesso delle misure adottate prima, durante e dopo l'evento calamitoso.

Il riparto delle responsabilità nelle emergenze è definito dall'art. 7 del Codice, che classifica gli eventi in tre tipologie, calibrate sulla base della loro intensità, estensione e sulla capacità dell'ente territoriale di farvi fronte con risorse ordinarie:

- gli eventi di tipo A sono quelli fronteggiabili dai Comuni o dalle loro forme associative, con i poteri ordinari e le risorse disponibili sul territorio;
- gli eventi di tipo B, invece, sono caratterizzati da una dimensione sovracomunale e richiedono l'intervento coordinato della Regione, che assume la direzione unitaria delle operazioni in raccordo con gli organi periferici dello Stato;
- gli eventi di tipo C sono infine quelli di intensità o estensione tale da richiedere mezzi e poteri straordinari, con l'attivazione diretta dello Stato e del Presidente del Consiglio dei Ministri, che può emanare ordinanze in deroga all'ordinamento vigente.

La distinzione tra eventi non è meramente descrittiva: essa attribuisce alle diverse autorità il potere-dovere di intervenire in forma progressiva, delineando la struttura multilivello della protezione civile.

Il decreto legislativo definisce inoltre l'architettura delle strutture operative del Servizio Nazionale di Protezione Civile, tra cui i Vigili del Fuoco, le Forze dell'Ordine, la Croce Rossa Italiana, il Sistema Sanitario Nazionale, le Forze Armate per quanto di competenza e il volontariato organizzato, cui è affidato un ruolo riconosciuto e disciplinato. Tali soggetti agiscono in un contesto di leale cooperazione istituzionale, coordinati, a seconda dei casi, dal Sindaco, dal Prefetto, dalla Regione o dal Dipartimento nazionale.

Tutto l'impianto normativo concorre a un obiettivo chiaro: attribuire a ciascun livello di governo compiti definiti e coordinati, evitando sovrapposizioni di responsabilità e garantendo una gestione strutturata degli eventi emergenziali, fondata su basi tecnico-scientifiche, giuridiche e organizzative solide.

L'ordinamento regionale della Protezione Civile in Emilia-Romagna

Il sistema di protezione civile dell'Emilia-Romagna è disciplinato dalla Legge Regionale 7 febbraio 2005, n. 1, che individua la sicurezza territoriale come finalità prioritaria dell'azione pubblica e definisce un modello organizzativo fondato sull'integrazione tra i diversi livelli di governo – Regione, Province, Comuni, Unioni di Comuni, Comunità montane e forme

associative – cui si affiancano le strutture tecniche regionali e il volontariato organizzato. Stabilisce infatti che il sistema regionale di protezione civile è composto da tutte le istituzioni che concorrono, ciascuna in relazione alle proprie attribuzioni, alla salvaguardia dell'incolumità delle persone, dell'ambiente e del patrimonio insediativo e produttivo.

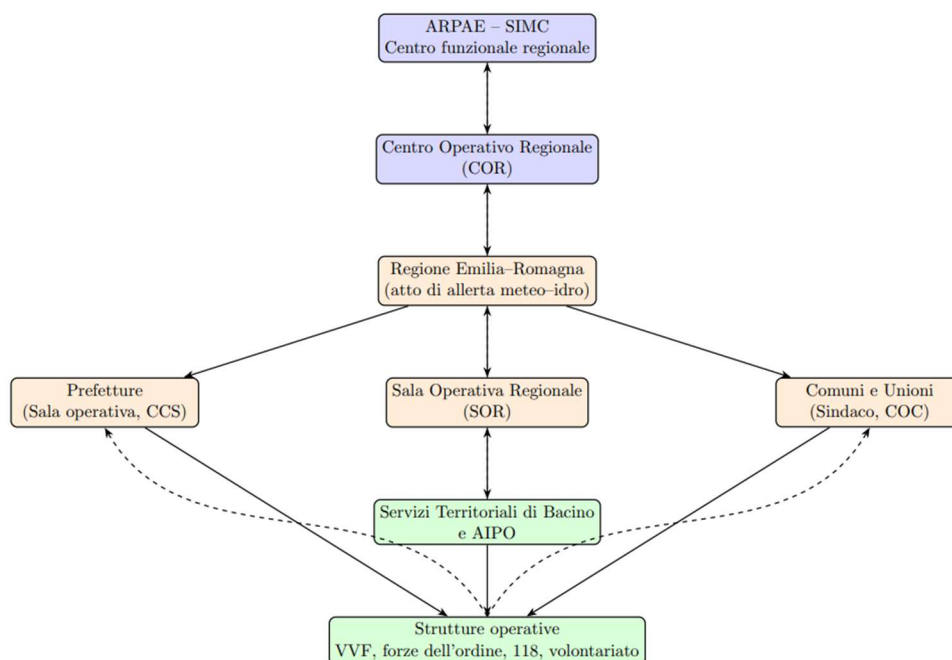
Le attività che compongono il sistema regionale di protezione civile includono la produzione del quadro conoscitivo dei rischi, la pianificazione delle emergenze, la formazione degli operatori, l'informazione alla popolazione, le attività di allertamento, il soccorso e il superamento dell'emergenza. La norma specifica che la Regione deve garantire non solo la capacità di analizzare e prevedere il rischio, ma anche quella di predisporre strumenti operativi, organizzativi e logistici idonei a mobilitare tempestivamente risorse e strutture, così da assicurare la continuità e l'efficacia delle attività di protezione civile.

La Regione detiene le funzioni di indirizzo, coordinamento e programmazione della Protezione Civile ed è chiamata ad assicurare l'unitarietà della gestione delle emergenze sul proprio territorio, coordinando gli enti locali e operando in stretto raccordo con le amministrazioni statali competenti.

Essa esercita funzioni di coordinamento operativo sugli eventi che eccedono la capacità dei singoli enti locali, guida la pianificazione regionale delle emergenze, promuove la costruzione di centri provinciali unificati di protezione civile e favorisce l'organizzazione di presidi comunali e intercomunali.

La Regione dispone di un apparato operativo strutturato: l'Agenzia per la Sicurezza Territoriale e Protezione Civile, dotata di autonomia tecnico-amministrativa e responsabile dell'attuazione delle attività previste dalla legge, compresa la gestione delle risorse e della colonna mobile regionale. L'articolazione operativa della Protezione Civile Regionale prevede la costituzione del Centro Operativo Regionale (COR), struttura permanente incaricata di garantire il coordinamento tecnico tra Regione, Enti Locali e centri funzionali, nonché del Comitato operativo regionale per l'emergenza (COREM), che assume funzioni di coordinamento strategico nelle situazioni più complesse. Nell'ambito della rete operativa sono inoltre previsti i Servizi Territoriali di Bacino (STB), ai quali la Regione affida il presidio idraulico, il monitoraggio dei corsi d'acqua e l'esecuzione degli interventi urgenti di messa in sicurezza, in un assetto di collaborazione strutturata con ARPAE, riconosciuta dalla normativa quale struttura tecnico-scientifica regionale.

La Legge Regionale attribuisce alle Province e ai Comuni compiti fondamentali. Le Province sono presidio territoriale per la rilevazione dei dati, per la pianificazione provinciale delle emergenze e per la gestione della viabilità e delle prime misure tecniche sul territorio. I Comuni restano autorità locali di protezione civile, responsabili della pianificazione comunale, dell'informazione ai cittadini e dell'attivazione dei servizi di soccorso e assistenza, confermando il potere-dovere del Sindaco di dirigere gli interventi di protezione civile sul proprio territorio.



L'ordinamento regionale configura quindi un sistema fortemente integrato, nel quale previsione, allertamento, pianificazione e gestione delle operazioni sono governate dalla Regione attraverso una rete di strutture specializzate e in rapporto costante con Prefetture, Province, Comuni, Unioni di Comuni e organizzazioni di volontariato. Questo assetto istituzionale, fondato su basi normative solide e coerenti con il quadro nazionale, costituisce la premessa per comprendere la specifica catena operativa regionale, analizzata nel capitolo successivo.

La cooperazione con il servizio Vigili del Fuoco Emilia-Romagna

In questo ambito, inoltre, il Sistema di Protezione Civile Regionale, soprattutto per quel che riguarda la prevenzione e la gestione dei rischi incendi boschivi e idrogeologici, si avvale

della cooperazione della Direzione Regionale dei Vigili del Fuoco dell'Emilia-Romagna, con l'obiettivo primario di potenziare le attività operative di protezione civile e rendere più efficaci gli interventi, ampliando l'operatività nei contesti emergenziali.

L'intesa si traduce in un rafforzamento del coordinamento tra le rispettive Sale Operative, attraverso il potenziamento delle connessioni e delle radiocomunicazioni, la gestione integrata delle chiamate di emergenza e la presenza dei Vigili del Fuoco presso la Sala Operativa Regionale, i Centri di Coordinamento dei Soccorsi e le Sale Operative Provinciali integrate, attivate in caso di allerte meteo o valanghe di particolare gravità.

La collaborazione si estende anche alla formazione, alle esercitazioni congiunte, che simulano scenari di emergenza, e alla condivisione di dati, cartografie, immagini e filmati per migliorare la conoscenza del territorio e supportare le attività di presidio.

Criticità del sistema di gestione delle emergenze

L'analisi congiunta dei sistemi di gestione delle emergenze mette in luce un impianto istituzionale e normativo complessivamente robusto, caratterizzato da una chiara articolazione delle competenze, da un buon livello di specializzazione tecnica e da una crescente integrazione tra livelli di governo. Tuttavia, l'esame dettagliato della catena di allertamento e di attivazione evidenzia alcune criticità strutturali che ne condizionano la piena efficacia, soprattutto nelle fasi iniziali degli eventi emergenziali.

Una prima area critica riguarda l'eterogeneità delle capacità operative a livello locale. Sebbene il Codice della Protezione Civile e la Legislazione Regionale attribuiscono al Sindaco un ruolo centrale, la disponibilità di personale tecnico formato, di strumenti digitali e piani di emergenza aggiornati varia sensibilmente tra Comuni, in particolare quelli di piccole dimensioni. Questa eterogeneità determina differenze nella capacità di recepire tempestivamente le allerte e di alimentare il flusso informativo verso i livelli superiori, generando "zone deboli" nella catena di protezione civile.

Un ulteriore elemento di criticità riguarda la complessità del sistema informativo, che vede la sovrapposizione di flussi informativi provenienti da soggetti diversi e da differenti sistemi di comunicazione, utilizzati per la trasmissione dei dati e per uno scambio più rapido delle informazioni, ma che può dare luogo a incoerenze documentali, disallineamenti informativi

e difficoltà nel ricostruire la sequenza degli accadimenti, soprattutto nelle fasi iniziali dell'emergenza.

Un importante elemento critico riguarda l'integrazione tra attori e competenze settoriali. La presenza di molteplici soggetti competenti (Regioni, Prefetture, Province, Comuni, ARPAE, STB, AIPO, Consorzi di Bonifica, gestori di reti) rende indispensabile un coordinamento continuo, disciplinato da un quadro giuridico chiaro, ma che può incontrare difficoltà quando la severità o la rapidità dell'evento rende necessario un aumento immediato del livello di coordinamento che, in condizioni di emergenza, può risultare gravoso e con conseguente rischio di frammentazione del quadro operativo e non sempre trova piena codificazione in strumenti condivisi. Inoltre, la gestione del rischio infrastrutturale appare ancora parzialmente separata dalla catena di allertamento.

In sintesi, la catena regionale di protezione civile dell'Emilia-Romagna costituisce un sistema tecnicamente avanzato e ben strutturato, ma la sua efficacia dipende in misura significativa dalla coerenza delle comunicazioni, dalla capacità dei livelli locali di svolgere le funzioni ad essi attribuite e dall'integrazione operativa tra gli attori coinvolti, elementi che possono manifestare criticità soprattutto nelle fasi iniziali e più concitate degli eventi emergenziali.

Obiettivi e Strategie operative

La ricostruzione metodologica della gestione delle emergenze consente di trarre alcune valutazioni utili sia sul piano analitico che applicativo. Infatti, si evince come il passaggio dalla conoscenza tecnica alla decisione politica e all'azione sul territorio costituisce il cuore del sistema e va supportato attraverso una struttura integrata multilivello. La presenza di strutture come ARPAE, l'Agenzia per la Sicurezza Territoriale e Protezione Civile, i Servizi Territoriali di Bacino e la Sala Operativa Regionale costituiscono una base importante per affrontare eventi complessi, ma è importante che siano messi in condizione di dialogare su piattaforme comuni, popolate di dati utili alla valutazione preventiva, da mettere poi nella disponibilità del decisore politico. La capacità di risposta, infatti, dipende sì dalla qualità delle risorse umane e dall'integrazione dei sistemi informativi, ma anche dalla qualità e dalla chiarezza delle informazioni che vengono fornite.

In particolare, è fondamentale operare nella gestione delle emergenze tenendo conto della strategicità strutturale delle infrastrutture e dei vari servizi ad esse legati, soprattutto se funzionali all'operatività dei servizi di sicurezza e del sistema socioeconomico, in modo da garantirne quanto più possibile la continuità e prevenire effetti dannosi a cascata in altri settori.

In previsione e in caso di eventi estremi, la protezione di tali infrastrutture, che si possono considerare a tutti gli effetti infrastrutture critiche, richiede un approccio integrato e proattivo, con particolare focus su:

- Garantire la continuità dei servizi essenziali (energia, acqua, trasporti, ICT, sanità, finanza) anche in scenari di crisi.
- Ridurre le vulnerabilità strutturali e operative, prevenendo effetti a cascata tra settori interdipendenti.
- Promuovere la resilienza come capacità di assorbire l'impatto, adattarsi e ripristinare rapidamente la funzionalità.
- Favorire la cooperazione multidisciplinare tra enti pubblici, privati e comunità scientifiche.

In questo quadro, non va dimenticata la valutazione quantitativa delle conseguenze economiche degli eventi estremi sulle infrastrutture critiche e sui servizi ad esse collegati, sia

nel breve sia nel lungo periodo, in quanto è essa stessa un importante elemento strategico. L'esperienza maturata da diversi soci nell'analisi dell'impatto dell'alluvione 2023 in Romagna mostra come l'uso di modelli statistici e di serie storiche ad alta granularità consenta di misurare in modo oggettivo le perdite e i tempi di ripristino per diversi settori (turismo, manifattura, logistica, servizi alla popolazione), aprendo così la strada allo sviluppo di modelli predittivi in grado di stimare ex-ante l'ordine di grandezza degli impatti associati a futuri scenari di crisi, grazie all'integrazione di dati di protezione civile, statistiche ufficiali e fonti amministrative, supportando sia la pianificazione preventiva sia la definizione di strategie di resilienza per le infrastrutture critiche e i servizi essenziali.

In questa prospettiva, l'impiego di modelli digitali integrati del territorio e delle infrastrutture può offrire un importante supporto anche nelle attività di simulazione e preparazione alle emergenze. Ambienti digitali basati su Digital Twin territoriali consentono infatti di riprodurre scenari di evento, simulare l'interruzione di infrastrutture critiche e valutare preventivamente le conseguenze sulla rete di accessibilità e sui servizi essenziali. Tali strumenti possono essere utilizzati per supportare la gestione operativa delle emergenze e per attività di pianificazione, test dei piani di protezione civile ed esercitazioni, contribuendo a rafforzare la capacità di risposta del sistema territoriale.

Al fine di raggiungere i sopraindicati obiettivi generali, la VC Intercluster intende focalizzarsi su tre macro-obiettivi principali, sfruttando le competenze dei soci dei quattro Clust-ER per valutarne lo stato dell'arte e svilupparne la fruibilità a livello locale e territoriale, lavorando al tempo stesso sull'interazione tra essi e gli altri servizi già in essere o in fase di sviluppo e definendo con precisione cosa servirà per raggiungerli, al fine di aprire un dialogo con gli stakeholder identificati, come la Protezione Civile e gli enti pubblici, ma anche i soggetti privati che gestiscono infrastrutture critiche e i singoli cittadini, e sviluppare soluzioni mirate. I tre macro-obiettivi sono:

- rafforzare la capacità di risposta ai rischi intervenendo prima della crisi
- garantire sicurezza e continuità operativa durante l'emergenza
- gestire in maniera sostenibile e resiliente le infrastrutture

OB 1 – Strategia per il Primo Obiettivo (Monitoraggio Pre-Crisi) Il primo obiettivo vede uno sviluppo interessante nell'uso della sensoristica e dei sistemi di monitoraggio, integrati in piattaforme già in uso e di facile lettura, che, insieme a sistemi di analisi dati e valutazioni predittive del rischio, possano mettere in guardia da scenari estremi e supportare nella vigilanza, nonché fornire in anticipo valide alternative di accesso in eventualità di interruzione dei servizi emergenziali e logistici.

OB 2 – Strategia per il Secondo Obiettivo (Comunicazione durante l'Emergenza) La tematica della comunicazione durante le emergenze non salvaguarda direttamente le infrastrutture critiche oggetto del progetto, ma permette di favorire l'intervento a supporto di sicurezza e continuità operativa, con l'obiettivo principale di sviluppare soluzioni che, sebbene già reperibili sul mercato se prese singolarmente, possano integrarsi alla rete esistente e permettano di mantenere attivi i servizi di comunicazione fondamentali anche durante l'emergenza o nel caso di malfunzionamenti locali, così da facilitare l'intervento tempestivo e puntuale e ridurre il rischio di isolamento.

OB 3 – Strategia per il Terzo Obiettivo (Infrastrutture Resilienti) L'attività dedicata alla gestione sostenibile e resiliente delle infrastrutture, vede come obiettivo principale quello di rafforzare le infrastrutture, intese come gli edifici destinati ad attività critiche e le infrastrutture viarie principali che collegano aree popolate e produttive, in modo da comprenderne le fragilità e renderli più resilienti agli eventi estremi. Lo stesso uso dei Sistemi Informativi Territoriali (SIT), integrando sia le informazioni ambientali che delle infrastrutture "critiche", può aiutare decisori pubblici e soggetti privati a definire strategie di intervento per mitigare gli eventuali rischi da evento.

Le analisi e le simulazioni per il monitoraggio pre-crisi

La sorveglianza del territorio è una pratica fondamentale per rafforzare la resilienza del territorio stesso e favorire una risposta più rapida e focalizzata ad eventi che stanno per verificarsi o si stanno già verificando e se ne prevede il peggioramento. A livello regionale sono già disponibili numerosi sistemi di monitoraggio ambientali, tra cui reti idrometriche e pluviometriche, sensori ambientali e fognari, osservazione satellitare (es. Copernicus) e Sistemi Informativi Territoriali (SIT). Un ulteriore elemento di evoluzione riguarda l'integrazione tra dati territoriali e modelli informativi delle infrastrutture presenti sul territorio. I sistemi GIS consentono infatti una rappresentazione efficace dei fenomeni ambientali e del contesto geografico, ma spesso non includono informazioni tecniche sufficientemente dettagliate sugli asset infrastrutturali esposti agli eventi estremi.

Nel complesso, la sorveglianza del territorio risulta ancora frammentata e prevalentemente reattiva, rendendo necessaria un'evoluzione verso un modello predittivo, interoperabile e continuo, integrato con la pianificazione logistica e la gestione delle emergenze. Inoltre, l'integrazione dei sistemi GIS con modelli informativi degli asset, quali modelli BIM o Asset Information Model, permetterebbe di associare alla dimensione territoriale dati relativi a caratteristiche costruttive, stato manutentivo, vulnerabilità note e interdipendenze funzionali delle infrastrutture critiche. Questa convergenza tra dati territoriali e modelli informativi consentirebbe di valutare in modo più accurato l'impatto degli eventi sul sistema infrastrutturale e di supportare decisioni operative basate non solo sulla pericolosità dell'evento, ma anche sulla fragilità degli asset coinvolti.

Pur rappresentando un patrimonio informativo rilevante, tali sistemi presentano criticità strutturali: assenza di una piattaforma unica di analisi e visualizzazione, limitato utilizzo di analisi predittive e simulazioni e impiego dei dati spesso a posteriori, con ridotta efficacia nella fase di pre-crisi.

Soluzioni esistenti e in uso nei sistemi di monitoraggio, potenzialità e criticità

Come anticipato, sono già presenti una serie di soluzioni consolidate per il monitoraggio ambientale, soluzioni che rispondono a molte problematiche ma che al tempo stesso mostrano che la fase di pre-crisi è ancora parzialmente scoperta a causa di una rara e difficile integrazione tra i dati ambientali, infrastrutturali e satellitari e della ridotta interoperabilità tra dati di monitoraggio ambientale e operatività dell'emergenza. In questo contesto, le soluzioni esistenti per la gestione degli eventi estremi possono essere ricondotte a tre principali categorie:

- Sistemi di allerta precoce
- Piattaforme GIS per la gestione dell'emergenza
- Digital Twin urbani e territoriali

Sistemi di allerta precoce (Early Warning Systems): gli EWS sono l'approccio più consolidato e si basano sul monitoraggio in tempo reale di variabili ambientali e su soglie di allerta. Sono ampiamente utilizzati da servizi meteo-idrologici e strutture di Protezione Civile, con esempi in Italia e in città come Amsterdam, Rotterdam e Amburgo. I principali limiti riguardano l'approccio settoriale, la scarsa integrazione con dati infrastrutturali e una capacità limitata di supportare decisioni operative e simulazioni di scenario.

Piattaforme GIS per la gestione dell'emergenza: le piattaforme GIS sono utilizzate prevalentemente durante o dopo l'evento per visualizzare cartografia, layer di rischio e informazioni operative. Diffuse presso Protezione Civile e amministrazioni locali (es. contesti urbani come Barcellona e Parigi), offrono buone capacità di visualizzazione e coordinamento. Tuttavia, presentano un uso limitato nella fase pre-crisi e un ruolo prevalentemente passivo del dato, con scarso ricorso ad analisi predittive.

Digital Twin urbani e territoriali: i Digital Twin rappresentano un approccio emergente, basato su rappresentazioni digitali dinamiche di territori e infrastrutture, alimentate da dati reali e modelli simulativi. Sono stati sviluppati in città come Singapore, Helsinki, Rotterdam, Londra e più recentemente Bologna, con applicazioni orientate a pianificazione, clima e infrastrutture. Nonostante l'integrazione crescente di dati IoT e satellitari, il loro utilizzo

rimane prevalentemente strategico e sperimentale, con limiti legati a complessità tecnologica, costi e ridotto impiego operativo nella fase di pre-crisi immediata. In ambito infrastrutturale, il Digital Twin non coincide con una semplice rappresentazione tridimensionale del territorio, ma rappresenta un ecosistema digitale dinamico che integra dati territoriali, modelli informativi degli asset, sensoristica e modelli previsionali, in grado di mettere in relazione fenomeni ambientali, stato delle infrastrutture e condizioni operative della rete territoriale, supportando simulazioni di scenario e analisi di impatto sugli asset critici.

Soluzioni di sistema integrate e rivolte ad operare in sinergia con i sistemi di analisi emergenziale

Le soluzioni esistenti citate nel capitolo precedente sono frutto di studi e sperimentazioni importanti e vanno valorizzate e sfruttate come punto di partenza per lo sviluppo di soluzioni ancora più integrate e in grado di fornire risposte ready-to-use da parte dei soggetti, pubblici e privati, preposti alle attività di monitoraggio, valutazione e risposta agli eventi emergenziali che potrebbero compromettere lo svolgimento di quelle attività essenziali per il funzionamento del sistema socio-economico regionale.

Le possibili soluzioni che si dovranno andare ad elaborare e sperimentare dovranno guardare nella direzione degli strumenti esistenti, cogliendo le principali qualità di ciascuno di essi e integrandoli in strumenti user friendly di facile approccio, che siano sufficientemente economici da usare e che forniscano risposte adeguate al bisogno dell'utente e lo mettano nelle condizioni di rispondere in maniera rapida e puntuale a rischi di emergenza.

In questo contesto, la possibilità di disporre di piattaforme che combinano dati ambientali, infrastrutturali e operativi consente di anticipare scenari critici e supportare decisioni informate. L'evoluzione verso Digital Twin territoriali interoperabili permette inoltre di superare la frammentazione tra monitoraggio ambientale, gestione delle infrastrutture e pianificazione dell'emergenza, offrendo uno strumento di supporto alle decisioni in grado di valutare preventivamente l'effetto degli eventi estremi sulla continuità dei servizi essenziali e sull'accessibilità del territorio. L'implementazione di ambienti digitali integrati con queste caratteristiche può rappresentare un ulteriore passo evolutivo verso piattaforme operative

condivise. Se progettate secondo logiche di usabilità e accessibilità, queste piattaforme possono mettere a disposizione di amministrazioni pubbliche, operatori della protezione civile, gestori di infrastrutture e altri soggetti coinvolti una base informativa comune, facilitando la comprensione degli scenari di rischio e il coordinamento delle decisioni operative.

È in questa direzione che si inserisce, a titolo di esempio, il progetto PRE-EMERGE: un esempio concreto di sistema di monitoraggio ambientale predittivo, progettato per integrare tecnologie avanzate e offrire un supporto operativo nella fase pre-crisi. Il paragrafo che segue illustra le caratteristiche e le potenzialità di questo strumento, evidenziando come possa contribuire a strutturare un sistema di maggiore resilienza delle infrastrutture e del territorio.

Lo strumento PRE-EMERGE, un esempio di sistema di monitoraggio ambientale predittivo

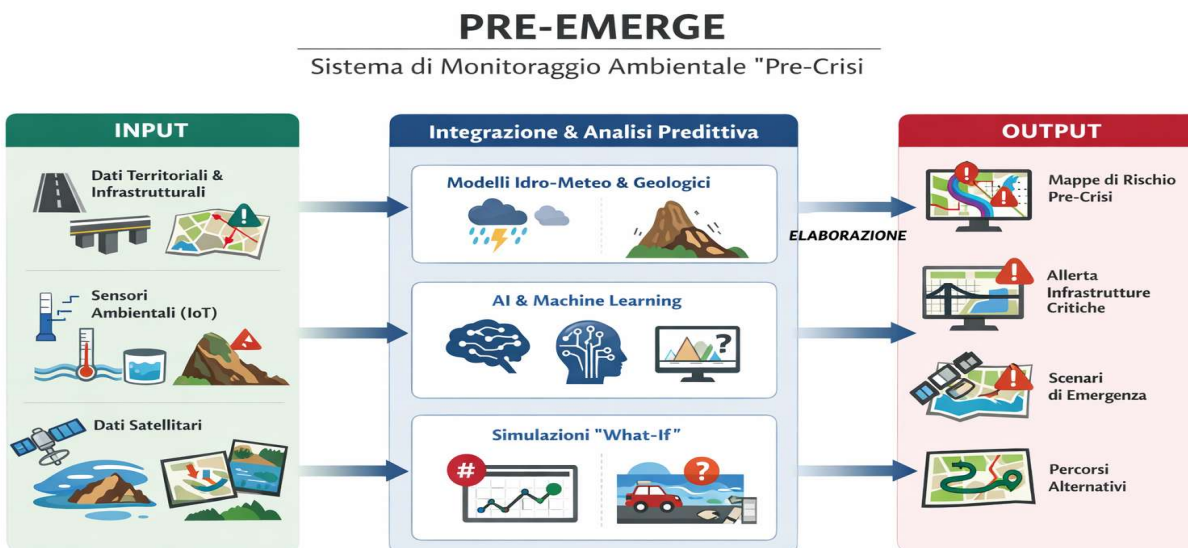
PRE-EMERGE (PREvenzione e Elaborazione EMERgenze GEO-ambientali) è un progetto, in fase di implementazione ad opera del Big Data Group³, che si propone come strumento di monitoraggio ambientale pre-crisi in grado di integrare dati da sensori sul territorio, osservazione satellitare, modelli ambientali e che permette, attraverso tecniche di analisi avanzata, di anticipare gli impatti degli eventi estremi sulle infrastrutture critiche.

È finalizzato a rafforzare la capacità di risposta ai rischi fisici legati a eventi estremi prima che l'emergenza si manifesti. Il sistema nasce dall'esigenza di superare un approccio prevalentemente reattivo alla gestione del rischio, mettendo a disposizione informazioni operative utili nella fase in cui le decisioni possono ancora ridurre l'impatto sull'infrastruttura e sulla logistica dell'emergenza.

PRE-EMERGE combina dati provenienti da sensori sul territorio, osservazioni satellitare e basi dati territoriali con modelli ambientali e strumenti di analisi avanzata. L'obiettivo non è soltanto osservare lo stato corrente del territorio, ma anticiparne l'evoluzione, individuando

³ Laboratorio Urban Intelligence and Healthcare Research, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" di Modena

in modo preventivo le criticità che potrebbero compromettere la funzionalità della rete infrastrutturale, come allagamenti di assi viari, instabilità di versanti, interruzioni di collegamenti strategici o isolamento di aree chiave.



Dal punto di vista operativo, lo strumento è pensato come un **elemento di raccordo tra monitoraggio ambientale, simulazione e pianificazione**, con un orientamento esplicito alla logistica dell'emergenza. Le informazioni prodotte sono destinate a supportare Protezione Civile, Vigili del Fuoco, servizi di soccorso ed enti gestori delle infrastrutture nella preparazione delle attività, ad esempio attraverso la definizione anticipata di percorsi alternativi e la valutazione della raggiungibilità di aree urbane ed extraurbane in condizioni critiche. Lo strumento è utilizzabile lungo l'intero ciclo dell'emergenza, ma trova il suo principale valore aggiunto nella fase pre-crisi.

Dal punto di vista tecnologico, si basa su un'architettura di **integrazione dati multi-sorgente** che consente di combinare dati territoriali e infrastrutturali, misure provenienti da sensori ambientali e informazioni satellitari. I dati vengono armonizzati nello spazio e nel tempo e resi disponibili all'interno di un ambiente GIS, che costituisce la base per le successive analisi. Su questa base informativa possono operare modelli di simulare (es. idro-meteorologici e geologici), affiancati da tecniche di **analisi predittiva e algoritmi di intelligenza artificiale**, utilizzate per individuare pattern anomali, stimare l'evoluzione del rischio e supportare valutazioni di tipo probabilistico.

Un elemento rilevante dello strumento è la sua **robustezza rispetto a problemi di affidabilità della sensoristica**. Eventuali mancanze di dati, malfunzionamenti o degradazioni delle misure dei sensori vengono mitigati attraverso l'integrazione con dati satellitari, informazioni spazialmente prossime e risultati modellistici, garantendo continuità al monitoraggio anche in condizioni critiche.

I risultati dell'analisi vengono tradotti in output direttamente utilizzabili dagli operatori: mappe dinamiche di rischio pre-crisi, individuazione automatica di infrastrutture e tratti viari critici, simulazioni di scenario che consentono di valutare l'impatto del superamento di determinate soglie ambientali sull'accessibilità del territorio. A queste informazioni si affiancano indicazioni operative, come la proposta di percorsi alternativi, l'individuazione di nodi logistici a rischio e la stima delle finestre temporali di intervento.

L'accesso alle informazioni avviene tramite una **piattaforma GIS interattiva** e dashboard dedicate agli utenti tecnici, facilmente integrabili con i sistemi regionali esistenti. Le basi dati prodotte risultano inoltre riutilizzabili anche nelle fasi post-evento e nella pianificazione strutturale, contribuendo a una visione di lungo periodo sulla resilienza del territorio.

Tale evoluzione dei sistemi di monitoraggio ambientale predittivo ha evidenziato l'importanza di integrare dati provenienti da fonti tecnologiche avanzate con informazioni raccolte direttamente dal territorio. Tuttavia, per ottenere un quadro realmente completo e tempestivo delle situazioni di rischio, è fondamentale valorizzare anche il contributo delle persone e delle amministrazioni locali. In questa prospettiva, il coinvolgimento attivo dei cittadini e degli enti pubblici diventa una risorsa strategica per arricchire e rendere più capillare il monitoraggio. Il paragrafo che segue presenta CITTADIN-AI, uno strumento che sfrutta le segnalazioni e le comunicazioni provenienti dalla comunità e dalle istituzioni, integrandole con i dati tecnici per supportare una gestione più reattiva e capillare delle emergenze.

CITTADIN-AI, un monitoraggio più capillare che nasce dalla comunità

CITTADIN-AI è uno strumento, sempre in corso di implementazione da parte del Big Data Group, che si trova ad agire in quella fascia di tempo tra l'assenza di crisi e la crisi vera e propria, ovvero quando tutto funziona ancora correttamente ma si iniziano a vedere i sintomi di quella che potrebbe diventare una emergenza. Si pone l'obiettivo di valorizzare le comunicazioni di cittadini, amministrazioni e Protezione Civile, trasformandole in informazioni strutturate e georeferenziate a supporto della gestione operativa. Nell'intervallo di tempo che separa dissesti ordinari da eventi critici, infatti, molte informazioni sul territorio sono diffuse in **testi non strutturati**: avvisi di chiusura strade o ponti, segnalazioni di allagamenti o frane, comunicazioni ufficiali su siti istituzionali e social media. Queste informazioni, pur tempestive, sono frammentate e difficili da integrare nei sistemi decisionali, anche in virtù del fatto che forniscono un quadro locale del problema.

L'integrazione di informazioni da molti sistemi locali, unitamente ai dati prodotti da altri strumenti quali il sopra citato PRE-EMERGE, permette di avere un quadro più completo e delineato del problema e di quanto questo sia sotto controllo o possa portare ad un'emergenza. Il sistema, infatti, raccoglie automaticamente contenuti da fonti eterogenee (siti ufficiali, comunicati pubblici, social istituzionali e contributi cittadini controllati), coinvolgendo la popolazione come "sensori diffusi", complementari a dati fisici e satellitari, intercettando, analizzando e trasferendo su PRE-EMERGE le informazioni quasi in tempo reale. Tramite tecniche di elaborazione del linguaggio naturale e modelli di linguaggio (NLP e LLM) vengono identificati tipologia di evento, elementi infrastrutturali coinvolti e la localizzazione spaziale.



Le informazioni così estratte, validate e integrate con PRE-EMERGE, permettono di fornire un quadro informativo completo e tempestivo, anticipando criticità infrastrutturali, migliorando la consapevolezza e supportando decisioni operative, grazie al contributo di tutti gli utenti. Ad esempio, una segnalazione di allagamento di una strada secondaria, potrebbe non essere segnalato da sensoristica, ma da abitanti e operatori dell'emergenza in loco.

Gli output sono resi disponibili su piattaforma GIS e dashboard operative, garantendo coerenza e continuità. Le informazioni strutturate diventano parte integrante del monitoraggio, utilizzabili in tempo reale o per analisi post-evento, contribuendo a costruire una memoria storica e migliorare strategie di preparazione e risposta alle emergenze.

La comunicazione: verso Infrastrutture ICT resilienti

L'obiettivo OB 2, ovvero la strategia volta a mantenere attivi i servizi di comunicazione fondamentali durante l'emergenza, si sviluppa a partire dalle potenzialità e dalle necessità operative delle moderne reti di comunicazione cellulari 5G.

Le loro caratteristiche di ottimizzazione per garantire efficienza, banda larga e controllo centralizzato consentono prestazioni notevoli in condizioni operative normali, ma nascondono anche un presupposto fragile: che l'infrastruttura persista, l'alimentazione sia continua, la connettività sia stabile e il coordinamento sia possibile. In situazioni di crisi, che si tratti di disastri naturali, interruzioni di corrente su larga scala o operazioni di ricerca e soccorso (Search And Rescue - SAR), questi presupposti vengono meno contemporaneamente. Ciò che si interrompe per primo non è necessariamente la copertura radio o la banda larga, ma la logica stessa con cui si prevede che funzionino i servizi in rete. Questa fragilità strutturale è stata ripetutamente documentata nelle analisi di risposta alle catastrofi da parte di organizzazioni internazionali di settore, quali il Focus Group dell'ITU sui sistemi di soccorso in caso di catastrofi⁴.

È importante avere una struttura che affianchi infrastrutture "sicure" alle "normali" infrastrutture di rete. Le infrastrutture resilienti "difficili da distruggere" non cercano di prevenire i guasti. Esse considerano i guasti come la norma e il loro obiettivo è, invece, la continuità del servizio: la capacità di sostenere i servizi ICT e di comunicazione (es. chat, messaggi vocali e chiamate voce) essenziali in condizioni degradate, intermittenti e imprevedibili. La ricerca sulle reti resilienti e sulla protezione delle infrastrutture critiche dimostra costantemente che i sistemi progettati per un degrado graduale superano quelli altamente ottimizzati, ma assai fragili, in situazioni di crisi⁵.

Questo cambiamento di prospettiva motiva un ecosistema stratificato di approcci la cui forza risiede proprio nella loro complementarità.

⁴ ITU-T Focus Group on Disaster Relief Systems, "Framework for disaster-relief systems," International Telecommunication Union, Tech. Rep., 2014

⁵ J. P. G. Sterbenz et al., "Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines," Computer Networks, vol. 54, no. 8, pp. 1245–1265, Jun. 2010

La *mesh* come una filosofia di design

Il *mesh networking* viene spesso presentato come un'alternativa tecnica alle infrastrutture centralizzate. In pratica, è meglio intenderlo come una linea guida di progetto per garantire il supporto a decentralizzazione e trasmissione reciproca, dove ogni nodo (o alcuni nodi selezionati) possa assumersi una responsabilità parziale per la sopravvivenza della rete. La connettività non è più garantita end-to-end, ma negoziata ad ogni *hop*. Studi empirici sulle reti comunitarie (ad esempio Guifi.net e Freifunk) e implementazioni tattiche *ad hoc* dimostrano come questa ridistribuzione delle responsabilità consenta il funzionamento continuo anche in presenza di numerosi guasti ai nodi e ai collegamenti.

Nei contesti SAR, dove le squadre si muovono in modo indipendente, il terreno ostacola la linea di vista e le infrastrutture possono essere assenti o danneggiate, la connettività *mesh* consente la comunicazione ovunque la vicinanza lo consenta. I rapporti NATO STO e prove sul campo hanno dimostrato che anche quando le prestazioni crollano, i percorsi si interrompono e la latenza aumenta, la rete non si interrompe, ma si deforma⁶. Questa capacità di degradarsi invece di fallire è proprio ciò che manca ai sistemi ottimizzati centralmente.

Tuttavia, una rete *mesh* da sola non è sufficiente, in quanto una rete *mesh ad hoc* classica presuppone percorsi continui e aggiornamenti frequenti. Quando le partizioni durano minuti o ore, l'instradamento dei dati si interrompe. In questo caso, il *networking* tollerante ai ritardi e alle interruzioni, Delay Tollerant Networking (DTN), integra la logica *mesh* ridefinendo la semantica stessa della comunicazione. Anziché basarsi sulla simultaneità, i dati vengono trasportati, archiviati e inoltrati in modo opportunistico. Decenni di ricerca sul DTN, dai primi lavori sull'Internet nello spazio ai più recenti esperimenti di networking umanitario condotti dal CICR, dimostrano che accettare il ritardo come parametro di progettazione consente la comunicazione laddove il networking in tempo reale è impossibile⁷.

La *mesh* e la tolleranza al ritardo formano insieme un *continuum* tra comunicazione sincrona e asincrona. Questo *continuum* è essenziale in ambienti dove la connettività oscilla in modo imprevedibile e la pianificazione non può presupporre né permanenza né immediatezza.

⁶ NATO Science and Technology Organization, "Communications in Degraded and Denied Operational Environments," STO Technical Report, 2019

⁷ V. Cerf et al., "Delay-Tolerant Networking Architecture," IETF RFC 4838, Apr. 2007

Basso consumo energetico come resilienza temporale

L'interruzione dell'alimentazione è spesso la causa principale della morte della rete. Di conseguenza, l'energia deve essere trattata non come un parametro operativo, ma come un vincolo strutturale. Gli studi condotti dall'IEEE PES e i rapporti sulle esercitazioni di risposta alle catastrofi identificano costantemente la perdita di alimentazione come il fattore principale che limita la longevità delle comunicazioni [1]. Ciò è largamente confermato dalle recenti alluvioni che si sono susseguite in anni recenti sul nostro territorio, emblematico il caso del centro storico della città di Faenza che ha portato all'allagamento delle stazioni di media tensione e, di conseguenza, alla caduta delle comunicazioni di prossimità sia Internet che cellulari (ciò anche a seguito della sempre maggiore 'localizzazione' del raggio di copertura delle antenne cellulari di nuova generazione, dal 4G in poi).

In tale ambito, le tecnologie di rete a bassa potenza, in particolare quelle che favoriscono *bitrate* ultra-bassi e lunghe durate, estendono l'orizzonte temporale della comunicazione. Tecnologie LPWAN come LoRa e NB-IoT, ampiamente documentate nei white paper del settore (ad esempio, Semtech, 3GPP⁸⁹), dimostrano un funzionamento da diversi giorni a diversi anni con budget energetici limitati. Sebbene tali sistemi non siano in grado di sostenere contenuti multimediali ricchi, eccellono in termini di persistenza.

Queste caratteristiche consentono di abilitare una diversa classe di servizi come i beacon di stato, gli avvisi, i segnali di localizzazione e la telemetria, che rimangono disponibili anche in presenza di disservizio della rete a banda larga. Le implementazioni sul campo da parte di organizzazioni come l'UN OCHA e *Médecins Sans Frontières*, hanno dimostrato che una segnalazione minima spesso ha un valore operativo sproporzionato¹⁰. È fondamentale sottolineare che gli approcci a bassa potenza non sostituiscono le comunicazioni *mesh* o a banda larga, ma costituiscono un substrato di segnalazione durevole.

⁸ Semtech Corporation, "LoRaWAN® for Disaster and Emergency Communications," White Paper, 2020

⁹ 3GPP, "NB-IoT; Technical Specification Group Services and System Aspects," TS 23.682

¹⁰ United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs, "Emergency Telecommunications Cluster: Field Operations Overview," UN OCHA Report, 2018

Eterogeneità: una leva strategica

Una caratteristica che distingue una rete resiliente è l'eterogeneità tecnologica. Radio multiple, bande di frequenza, famiglie di protocolli e fonti di energia coesistono, non per massimizzare le prestazioni, ma per resistere a guasti uniformi. La letteratura sull'ingegneria della resilienza sottolinea ripetutamente la diversità come meccanismo fondamentale di resilienza, che supera la pura ridondanza nei sistemi complessi.

Ciò che degrada un mezzo può risparmiarne un altro. Ciò che è bloccato, ostruito o sovraccarico in una banda può rimanere funzionante altrove. Questa logica si estende oltre le radio alle architetture: la comunicazione peer-to-peer integra i collegamenti assistiti dall'infrastruttura; la diffusione incentrata sui contenuti integra l'indirizzamento degli endpoint; i dispositivi trasportati dall'uomo integrano i relè statici¹¹.

I nodi mobili, comprese persone, veicoli, droni ecc., diventano parte dell'infrastruttura non per eleganza progettuale, ma per necessità. Il movimento colma le divisioni. Gli incontri diventano eventi di instradamento. La comunicazione cessa di essere puramente tecnica e diventa socio-tecnica, integrata nel comportamento umano e nella logistica. Questo fenomeno è stato documentato in studi di networking opportunistico e tracce di mobilità su larga scala analizzate dalla comunità CRAWDAD.

Azioni di mappatura e generazione di scenari

Da un punto di vista operativo, la prima delle attività fondamentali da mettere in atto è il censimento accurato di tutte le componenti fisiche presenti sul territorio e che permettono la connessione: dalle antenne per la telefonia mobile ai ponti radio, fino alle dorsali in fibra ottica che costituiscono l'ossatura della banda larga. Queste informazioni sono già disponibili ma frazionate tra i vari proprietari di dati e di difficile interpolazione strategica.

Questo lavoro di mappatura non si deve limitare alla semplice raccolta di informazioni, bensì deve diventare uno strumento di analisi tecnica e strategica: capire se una determinata area dipende da una singola infrastruttura senza ridondanza oppure se un nodo di rete è

¹¹ L. Zhang et al., "Named Data Networking," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 44, no. 3, pp. 66–73, Jul. 2014

particolarmente vulnerabile perché collocato in una zona esposta a rischio idrogeologico. Integrando i dati provenienti dagli operatori di telecomunicazioni, dai registri nazionali e dalle amministrazioni locali, è possibile costruire un quadro completo che, grazie all'utilizzo di sistemi informativi geografici (GIS), assume una forma chiara e immediatamente interpretabile.

Parallelamente al censimento, occorre procedere con la simulazione di ciò che potrebbe accadere alla rete di comunicazione in caso di eventi estremi, in modo da lavorare per aumentarne la resilienza, suggerendo la creazione di percorsi alternativi, ridondanze e sistemi di backup in grado di garantire continuità operativa anche in condizioni difficili e prevenire scenari come quelli simulati.

Ciò che rende una rete resiliente è un insieme coordinato di strategie: connettività *mesh* che redistribuisce la responsabilità, tolleranza al ritardo che ridefinisce il tempo, persistenza a basso consumo che estende la sopravvivenza, eterogeneità che resiste al fallimento uniforme e scelte architettoniche che privilegiano la scomposizione rispetto all'ottimizzazione.

Strategie e ipotesi operative per affrontare l'emergenza

In sinergia e a supplemento di tali approcci, è molto importante introdurre nuovi processi e soluzioni tecnologiche. Una prima possibile proposta, avanzata dal socio CIRI ICT (Centro di ricerca industriale dell'Università di Bologna per le tecnologie dell'informazione e della comunicazione) su cui è possibile ragionare grazie alle nuove possibilità abilitate dal 5G consiste nel dispiegare tecnologie mesh a basso costo che consentano di assorbire il picco di emergenza attraverso soluzioni temporanee. In tal senso, ci si propone di studiare una soluzione ibrida che, ipotizzando la non caduta completa della rete cellulare sull'intero territorio possa, attraverso la tecnologia mesh, creare un ponte tra le zone non più coperte perché colpite dalla perdita di alimentazione (ad esempio a causa di alluvioni, come spiegato sopra) e la rete ancora funzionante (ma non più raggiungibile). Tale soluzione potrebbe anche prevedere il dispiegamento sul territorio di generatori elettrici a basso costo (ad esempio generatori a benzina) opportunamente strumentati con tecnologie di comunicazione cellulari a bordo che possano creare la 'spina dorsale' della mesh di supporto necessaria in condizioni estreme e di picco. Contestualmente, si dovrebbe prevedere la creazione di una rete di volontari addestrati alla accensione/messa in opera della stessa mesh al verificarsi della situazione di emergenza, come ad esempio oggi accade, in ambito

diverso, per i defibrillatori (DAE) distribuiti sul territorio. Tale soluzione è pensata soprattutto per la popolazione, in modo da integrare le soluzioni già esistenti per gli esperti di protezione civile che possono usare altre infrastrutture dedicate che potrebbero, in questo modo, essere ulteriormente potenziate con un canale di comunicazione ulteriore e alternativo.

Criteri per la classificazione delle infrastrutture sensibili

Quanto introdotto e discusso nei precedenti capitoli diventa tanto più importante quanto più si entra in un contesto di infrastrutture viarie prioritarie e di immobili strategici, in quanto rivestono un ruolo particolarmente rilevante per il sistema socioeconomico regionale. L'obiettivo diventa quindi duplice: da un lato individuare e classificare gli elementi del territorio più sensibili e strutturali; dall'altro costruire una base informativa solida che consenta di definire priorità di intervento in maniera oggettiva, coerente e integrata con la pianificazione vigente.

Individuazione dell'infrastruttura viaria sensibile

La prima fase del lavoro riguarda la ricognizione e la classificazione delle infrastrutture viarie prioritarie che possono essere considerate sensibili rispetto al rischio frana e idrogeologico. In questo insieme rientrano non solo le principali arterie stradali, ma anche i ponti, i viadotti e i tratti di collegamento secondari che assumono importanza strategica per la mobilità locale.

La sensibilità di un tratto stradale non dipende unicamente dalla sua esposizione fisica al pericolo, ma anche dalla sua funzione. Una strada che connette un centro abitato a un presidio sanitario, ad esempio, avrà una priorità alta anche se l'indice di pericolosità è moderato, perché la sua interruzione provocherebbe un isolamento con ricadute rilevanti sulla sicurezza delle persone.

Individuazione di classi di edifici sensibili

Parallelamente alla ricognizione della rete viaria, è necessaria una classificazione degli edifici strategici che, per funzione o valore, possono essere considerati sensibili. Tra questi rientrano:

- **Edifici e impianti di produzione e trasformazione energetica**, fondamentali per il mantenimento delle comunicazioni e del sistema socioeconomico;

- **Scuole e edifici scolastici**, luoghi con alta concentrazione di persone e necessità di evacuazione ordinata;
- **Ospedali, ambulatori e strutture socio-sanitarie**, essenziali per l'assistenza durante eventi emergenziali;
- **Edifici strategici**, quali municipi, centrali operative della polizia locale, caserme dei vigili del fuoco e altre sedi operative critiche;
- **Archivi, biblioteche e sedi contenenti beni documentali**, in quanto sede di beni altamente deperibili e spesso insostituibili.

L'analisi di questi edifici non si limita a una semplice elencazione; occorre considerarne anche l'accessibilità in caso di emergenza, la collocazione rispetto alle aree di pericolosità e la disponibilità di vie alternative in caso di interruzioni.

Censimento delle infrastrutture e verifica rispetto al PGRA

Una volta individuati strade, ponti ed edifici sensibili, il passo successivo consiste nel loro censimento e nella verifica della loro collocazione geografica rispetto alle criticità, a partire da quelle individuate dal PGRA. Le mappe di pericolosità e rischio del PGRA rappresentano infatti la base ufficiale per la valutazione del rischio idraulico e idrogeologico e consentono di associare ogni elemento censito a una classe di rischio definita.

In questo contesto, i Sistemi Informativi Geografici (GIS) rappresentano una piattaforma fondamentale non solo per la gestione dei dati territoriali, ma anche per l'implementazione di metodologie multi-criteriali capaci di integrare variabili eterogenee e fornire un quadro decisionale più solido e trasparente.

L'applicazione dei GIS nella rappresentazione delle reti urbane prevede un approccio analitico basato su valutazioni multi-criteriali che consentono di integrare indicatori fisici, funzionali, ambientali e socio-economici. Essi permettono, quindi, di analizzare le reti in modo più complessivo, considerando non solo la loro configurazione, ma anche i fattori esterni che influiscono sulla loro capacità di funzionare correttamente.

Questa valutazione multi-criteriale permette di ottenere una visione integrata che mette in relazione:

- la posizione dell'infrastruttura o dell'edificio;
- la pericolosità dell'area (frequenza ed estensione potenziale degli eventi);
- la vulnerabilità dell'elemento stesso;
- l'importanza strategica della funzione svolta.

Il risultato è un quadro dettagliato del livello di esposizione e della rilevanza operativa di ciascun elemento che, affiancato da tecniche di valutazione analitica e predittiva, permette di costruire mappe di rischio e priorità basate su pesi attribuiti a criteri specifici, calibrati in funzione delle esigenze del contesto urbano.

Supporto alla gerarchizzazione delle infrastrutture in ottica di resilienza

Con l'insieme dei dati raccolti è possibile procedere a un'analisi spaziale basata su criteri oggettivi, che consente di classificare gli elementi censiti in termini di priorità di intervento. L'obiettivo è identificare quali infrastrutture necessitino di azioni urgenti, quali richiedano un monitoraggio costante e quali possano essere oggetto di interventi programmati nel lungo periodo.

In un'ottica di resilienza, infatti, non tutte le infrastrutture hanno lo stesso peso: alcune svolgono funzioni essenziali per il funzionamento del sistema urbano, mentre altre rappresentano alternative di minor impatto in caso di interruzione.

Attraverso l'analisi integrata dei dati è possibile stabilire:

- quali infrastrutture costituiscano elementi vitali per la continuità dei servizi urbani;
- quali tratti della rete viaria abbiano un ruolo critico per l'accessibilità a strutture strategiche;
- dove sia necessario intervenire per aumentare la capacità del sistema di assorbire o resistere a eventi estremi.

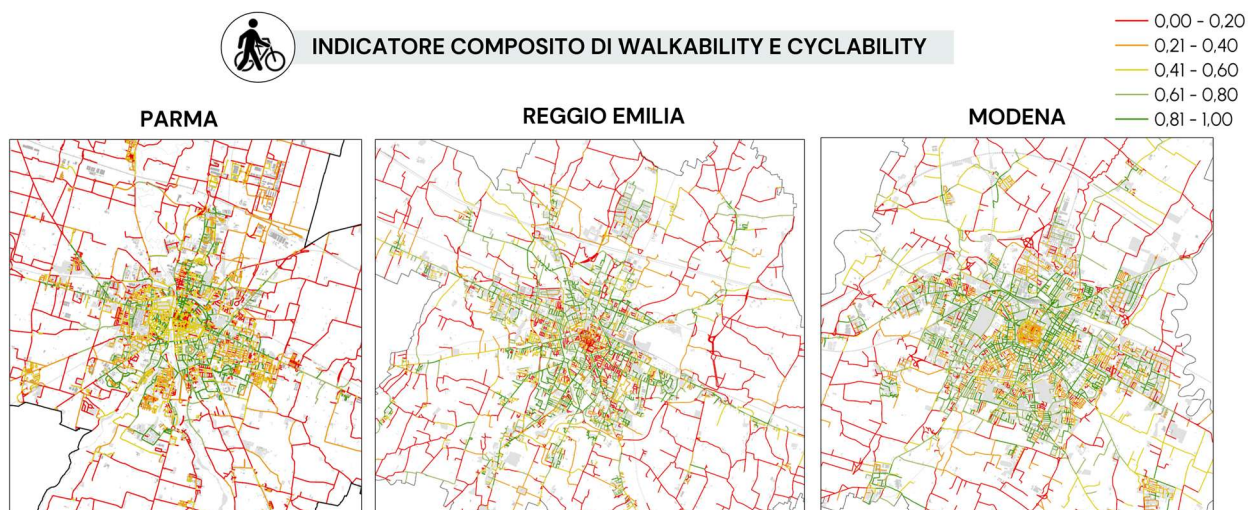
La gerarchizzazione non è quindi un semplice esercizio di classificazione, ma un processo che richiede una comprensione approfondita delle interazioni tra infrastrutture, morfologia urbana e rischi territoriali. La metodologia proposta consente di attribuire a ciascun

elemento della rete un livello di criticità basato su criteri quantitativi, riducendo la soggettività e favorendo decisioni più consapevoli.

L'approccio risultante permette alle amministrazioni e ai pianificatori di operare scelte preventive, quali la programmazione degli investimenti, in modo efficiente e volto alla continuità operativa, migliorando la resilienza complessiva del sistema urbano attraverso interventi mirati, scalabili e frutto di scelte trasparenti.

Gli strumenti di mappatura e analisi GIS

Tra gli strumenti che, sebbene in contesti differenti da quello emergenziale, riescono già a fornire risposte operative che potrebbero fungere da base per l'elaborazione del sistema di mappatura e gerarchizzazione delle infrastrutture o fare da guida metodologica per esso, c'è la mappatura delle reti pedonali e ciclabili delle città di Parma, Modena e Reggio Emilia, sviluppata nell'ambito di progetti di ricerca recenti e in grado di integrare il grafo della rete con numerosi attributi fisici, funzionali e ambientali della rete stradale, includendo anche primi attributi utili alla valutazione della resilienza delle infrastrutture (es. condizioni di sicurezza, accessibilità, larghezze delle sezioni stradali).



Estendendo la metodologia GIS di cui sopra a parametri di rischio legati a eventi estremi di diversa natura (allagamenti, ondate di calore, dissesti strutturali, interruzioni della continuità infrastrutturale), diventa possibile la messa a disposizione, all'interno di piattaforme GIS interoperabili di studi esistenti o da realizzare ad hoc sui diversi territori, di

informazioni trasversali e condivise in grado di supportare il decisore locale. In tale sistema risulta possibile l'integrazione del modello GIS con dati provenienti non solo da banche dati ufficiali già disponibili, ma anche prodotti nell'ambito dei diversi settori che operano nel campo della ricerca.

Conclusioni

Nessun singolo approccio è in grado di produrre una struttura resiliente di per sé in situazioni di crisi.

L'analisi condotta mette in evidenza come la resilienza delle infrastrutture urbane e territoriali non possa essere affidata a un singolo approccio o a una soluzione tecnologica isolata. Al contrario, la complessità e la frequenza crescente degli eventi estremi impongono una visione integrata, in cui la conoscenza approfondita delle reti e la capacità di valutare criticità e priorità attraverso strumenti avanzati e di facile lettura diventano elementi imprescindibili per la pianificazione e la gestione del rischio.

Ciò di cui c'è maggiormente bisogno è la possibilità di mettere a sistema tutte le informazioni che sono già oggetto di analisi ed elaborazione da parte di uno o più soggetti coinvolti, elaborarle all'interno di un quadro più ampio e renderle disponibili per tutti gli operatori chiamati a portare il proprio contributo alla resilienza del territorio, pianificatori locali e territoriali, squadre operative durante l'emergenza e soggetti ed Enti operativi una volta risolta la crisi.

In questo contesto, l'estensione della metodologia GIS, arricchita da valutazioni multicriteriali, consente di superare la semplice rappresentazione cartografica delle reti, offrendo invece una piattaforma dinamica in grado di integrare dati eterogenei, simulare scenari di crisi e supportare decisioni tempestive e informate. Questo approccio permette di individuare non solo le vulnerabilità fisiche delle infrastrutture, ma anche di valutare il loro ruolo strategico all'interno del sistema urbano, favorendo una gerarchizzazione che tenga conto sia della funzione che della posizione rispetto ai rischi specifici del territorio.

La resilienza, in questa prospettiva, non è più solo una caratteristica tecnica, ma diventa un obiettivo trasversale che coinvolge amministrazioni, gestori di infrastrutture, comunità scientifica e cittadini. Solo attraverso la collaborazione e la condivisione di dati e competenze è possibile costruire sistemi urbani capaci di assorbire gli impatti, adattarsi e ripristinare rapidamente la funzionalità dopo una crisi, verso una gestione più consapevole e proattiva delle infrastrutture critiche.