

Enrico Quagliarini¹, <https://orcid.org/0000-0002-1091-8929>

Mariella De Fino², <https://orcid.org/0000-0002-2675-704X>

Elena Cantatore², <https://orcid.org/0000-0003-2294-6561>

Fabio Fatiguso², <https://orcid.org/0000-0003-4584-3776>

Gabriele Bernardini¹, <https://orcid.org/0000-0002-7381-4537>

e.quagliarini@staff.univpm.it

mariella.defino@poliba.it

elena.cantatore@poliba.it

fabio.fatiguso@poliba.it

g.bernardini@staff.univpm.it

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche, Italia

² Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica, Politecnico di Bari, Italia

Abstract. I centri storici sono caratterizzati da condizioni di valore del patrimonio, dinamiche d'uso, vulnerabilità fisica e possibili bassi livelli di resilienza, tali da rendere questi ambienti costruiti urbani fragili a rischi naturali e antropici, sia singoli che combinati. Incrementare la sicurezza (multi-) rischio in questi contesti richiede un approccio dinamico e centrato sugli utenti, tramite strumenti di simulazione avanzata e comunicazione immersiva e virtuale, accrescendo consapevolezza e capacità di risposta degli stakeholders. La presente ricerca sviluppa modelli e strumenti ingegneristici per valutare il rischio, da singolo a multiplo, e proporre interventi di mitigazione efficaci. Le potenzialità di metodi e strumenti sono mostrate grazie ad esempi dai progetti BE S2ECURe e ReACT.

Parole chiave: Ambiente costruito urbano; centri storici; vulnerabilità degli edifici; utenti; tecnologie digitali; multi-rischio.

Introduzione

Per incrementare la resilienza al rischio degli Ambienti Costruiti Urbani (UBE – *Urban Built Environment*) occorre progettare e implementare strategie capaci di garantire la sicurezza per tutte le tipologie di utenti di edifici, spazi aperti urbani (strade, piazze) e infrastrutture, in scenari di rischio singolo e multiplo (Sharifi, 2019; Curt, 2021). Questo tipo di azioni necessita di una valutazione olistica dei fattori di rischio, includendo non solo la sinergia tra pericolosità (di diversa natura e severità) e vulnerabilità fisica (es. delle strutture), ma anche di queste con il numero (esposizione) e la tipologia (vulnerabilità individuale per abilità motorie/sensoriali, età, genere, familiarità con rischi e UBE) degli utenti esposti, delle relative variazioni

spazio-temporali legate all'uso degli UBE e dei loro comportamenti in emergenza (Polese *et al.*, 2024; Duan e Fei, 2025). Le interazioni tra questi fattori sono particolarmente critiche nei contesti dei centri storici, spesso caratterizzati da configurazioni morfologiche costruttive compatte, complesse e stratificate, elevato valore del patrimonio, e carenza di soluzioni di mitigazione efficaci (Julia and Ferreira, 2021).

Inoltre, gli UBE storici sono particolarmente influenzate da una forte attrattività per gli utenti, con le dinamiche d'uso che dipendono principalmente da funzioni attrattive aperte al pubblico, inclusi pendolari e turisti con limitata conoscenza di spazi e rischi, e generano significative variazioni orarie, giornaliere, settimanali e stagionali del rischio (Duan e Fei, 2025). Inoltre, la rapidità di insorgenza dei disastri e la coincidenza spazio-temporale di più rischi, combinabili a condizioni di potenziale sovraffollamento, assumono ulteriore rilevanza (Curt, 2021; Julia and Ferreira, 2021). I disastri a insorgenza rapida (SUOD – *Sudden Onset Disasters*), come sisma, atti terroristici, incendi e alluvioni, possono chiedere l'attivazione di procedure di emergenza, mentre quelli ad insorgenza lenta (SLOD – *Slow Onset Disasters*), legati ad esempio a cambiamento climatico, isola di calore urbana (UHI) e inquinamento atmosferico, si sviluppano gradualmente pur con possibili condizioni di picco (es. ondate di calore). SUOD e SLOD possono presentare severità diverse, con effetti non critici fino al collasso, aggravati negli UBE per usi eccezionali o vulnerabilità elevate. Ad esempio, scenari

Risk resilience in historic urban environments: a user-centred approach

Abstract Historic Urban Built Environments are stressed by several risks, which can be either single or combined, with effects exacerbated by heritage features, user dynamics, and poor resilience level. Herein, (multi-)risk reduction and mitigation imply following a user-centred, dynamic approach, exploiting simulation tools and virtual reality risk communications towards stakeholders to additionally increase awareness and preparedness. This research aims at developing predictive models and tools for assessing and mitigating single to multiple risks in these scenarios, considering the interactions of users with hazards, physical vulnerability factors, and deployable strategies. Examples from BE S2ECURe and ReACT projects, adopting this approach, are shown to demonstrate its capabilities.

Keywords: Built Environment; building vulnerability; user exposure; digital technologies; multi-hazard.

Introduction

Enhancing risk resilience of Urban Built Environments (UBEs) means designing and implementing strategies able to ensure safety for all users across buildings, open spaces, and infrastructures, considering both single and multi-risk scenarios (Sharifi, 2019; Curt, 2021). This requires integrating assessment methods on hazards (of different type and severity) not only with those on physical vulnerability, but also with analysis on exposed users' number, vulnerabilities (i.e., motion/sensory abilities, age, gender, familiarity with risks and UBEs), spatiotemporal variations depending on UBEs use, and behaviours in single and multi-risk situations (Polese *et al.*, 2024; Duan and Fei, 2025). Interactions among these factors influence risk levels, especially in complex UBEs like historic ones, which are often haz-

ard-prone and characterised by compact layouts, composite morphological and constructive structure, high heritage value, and user attractiveness (Julia and Ferreira, 2021).

In historic UBEs, usage dynamics mainly depend on attractive functions open to the public, including commuters and tourists with limited preparedness, thus leading to relevant hourly, daily, weekly and seasonal variations in user types and densities (Duan and Fei, 2025). Moreover, the rapidity of disaster onset, and the spatiotemporal coincidence of several risks, including (over)crowding, also assume a strong relevance in risk assessment and management (Curt, 2021; Julia and Ferreira, 2021). SUODs (Sudden Onset Disasters) like earthquakes, terrorist acts, fires and floods demand an immediate response, as well as emergency procedures. Conversely, SLODs

di grande evento in caso di SUOD (es. sisma) possono generare condizioni sempre più rischiose, in particolare per utenti non familiari all'UBE (es. visitatori), al crescere degli impatti. Se combinato con un picco SLOD (es. ondata di calore), il rischio si intensifica per via della maggiore concentrazione di persone in aree vulnerabili (es. spazi interni, prossimità delle facciate di giorno). Approcci dinamici, centrati sull'utente e che considerano diverse severità del disastro possono quindi supportare gli stakeholders nella valutazione e gestione degli impatti da rischio singolo e multiplo, anche attraverso modelli tipologici basati su condizioni ricorrenti di rischio e UBE, riducendo la complessità nell'analisi del sistema specialmente per figure a limitata esperienza (An and Ochiai, 2025).

Per affrontare questi aspetti e superare i limiti dei metodi attuali, questa ricerca propone un flusso operativo per valutare e ridurre il (multi-)rischio negli UBE storici, promuovendo l'uso di: (1) strumenti predittivi e *user-centred* per determinare l'impatto di numero, tipo e comportamento degli utenti sul livello di rischio; (2) modelli tipologici rappresentativi di scenari reali, derivati da dati su contesti reali; (3) soluzioni di comunicazione e coinvolgimento degli stakeholder in Realtà Virtuale (VR). Il lavoro mostra esempi significativi tratti dalle attività di ricerca dei progetti BE S²ECURE ("*Built Environment Safer in Slow and Emergency Conditions through behavioural assessed/designed Resilient solutions*", finanziato da MIUR nell'ambito PRIN 2017) e ReACT ("*Resilient urban and metropolitan built environments through inclusive multi-risk behavioural-based models and simulations*", finanziato da PNRR), nei quali strumenti e metodi sono stati definiti e applicati.

(Slow Onset Disasters), such as risks correlated with climate change, UHI (Urban Heat Island), and air pollution slowly rise over time, but could appear with short-time peak situations (e.g., heatwaves). SUODs and SLODs can have different severity levels, ranging from non-critical to (near)-collapse scenarios, which can be exacerbated in coupled events or compound conditions, especially in UBEs characterised by exceptional use or vulnerability. For instance, a SUOD (e.g., earthquake) occurring during a mass gathering can cause overcrowding and more critical response than in normal use scenarios, especially for unaware users (e.g., visitors). If combined with SLOD peak conditions (e.g., heatwave), risks intensify due to more dense crowding in vulnerable areas (e.g., indoors, near façades). Hence, dynamic and user-centred approaches could sup-

port decision-makers in assessing and managing single and multi-risk impacts, especially using rapid models of typical (recurring) UBEs and risk conditions, which reduce complexities for low-trained stakeholders (An and Ochiai, 2025).

To include these key points and overcome limitations of current methods, this research aims to provide an operational workflow for single to multi-risk assessment and reduction in historic UBEs. The approach fosters the use of: (1) user-centred and predictive tools to analyse behavioural impacts in disaster-affected UBEs; (2) streamlined typological models, from on-field studies of real-world cases; (3) Virtual Reality communication solutions to increase stakeholder engagement. This paper also provides some related, relevant examples from the research developed under the BE S²ECURE ("*make*) Built

Il workflow: dall'analisi user-centred alla mitigazione del (multi-) rischio

dati relativi ai fattori di rischio, secondo un approccio multilivello e multiscala (Sharifi, 2019; Polese *et al.*, 2024) consente, in primis, la definizione di scenari di (multi-)rischio, includendo le dinamiche d'uso degli UBE. I dati da casi studio reali sono elaborati per individuare condizioni ricorrenti e critiche, tramite (1) linee narrative, le *storylines*, e (2) scenari "*what-if*".

Tali scenari sono valutati con strumenti di simulazione per stimare gli effetti del (multi-)rischio in condizioni attuali, ovvero prima dell'applicazione di specifiche strategie di incremento della resilienza (*pre-retrofit*), considerando severità di SUOD/SLOD, loro combinazioni e risposta degli utenti (Bernardini, Sparvoli *et al.*, 2025). Il confronto tra scenari *pre-retrofit* e legati ad alternative di intervento (*post-retrofit*), e la selezione delle relative strategie strutturali (azioni fisiche sull'UBE) e non strutturali (preparazione, management, pianificazione) per fattibilità e impatto, avviene tramite (1) indicatori singoli di tipo KPI (Key Performance Indicators) e (2) metriche di combinazione dei KPI, entrambe basate sugli output di simulazione.

L'ultima fase prevede la comunicazione e il coinvolgimento degli stakeholder, attraverso strumenti digitali e soluzioni XR (*eXtended Reality*), per supportare la comprensione e la gestione del rischio da parte di decisori (es. amministratori locali e tecnici, per la consultazione strutturata di scenari) e cittadini (es.: training al rischio).

L'approccio si fonda su tre pilastri e cinque principi operativi, organizzati nel workflow illustrato in Figura 1.

La raccolta e organizzazione di

Environment Safer in Slow and Emergency Conditions through behavioural assessed/designed Resilient solutions" funded by MIUR under PRIN 2017), and the ReACT ("*planning*) Resilient urban and metropolitan built environments through inclusive multi-risk behavioural-based models and simulations" funded by PNRR) projects, in which the workflow has been defined and applied.

The workflow: from user-centred (multi-)risk assessment to mitigation

The approach relies on three main pillars and five basic principles, as organised in the workflow of Figure 1.

The scenario creation relies on collection and organisation of data from relevant risk factors, pursuing a multi-layer and multi-scalar approach (Sharifi, 2019; Polese *et al.*, 2024), and

including user dynamics in the UBEs. Data from single real-world case studies can be elaborated using statistical methods to define critical and recurring situations in terms of typological (1) storylines and "what-if" scenarios, and (2) UBE conditions.

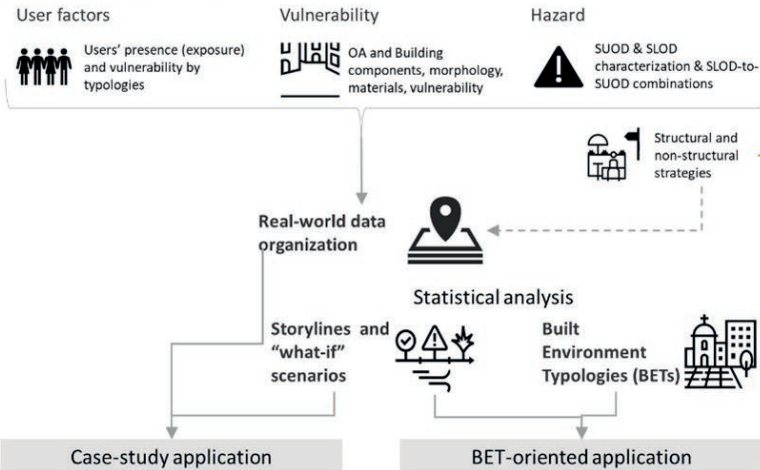
Scenarios are then assessed using simulation-based evaluation tools to evaluate basic single and multi-risk levels in current (pre-retrofit) conditions, which can estimate (multi-)risk effects depending on severity and user response (e.g., casualties, evacuation timing and path, possibility to be rescued) (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al.*, 2025). Hence, simulations provide insights for comparison of alternative scenarios in pre-retrofit and post-retrofit situations, using (1) easy-to-use KPIs (Key Performance Indicators) representing effects of (multi-)risk factors on UBEs and users, and (2) KPIs

Workflow

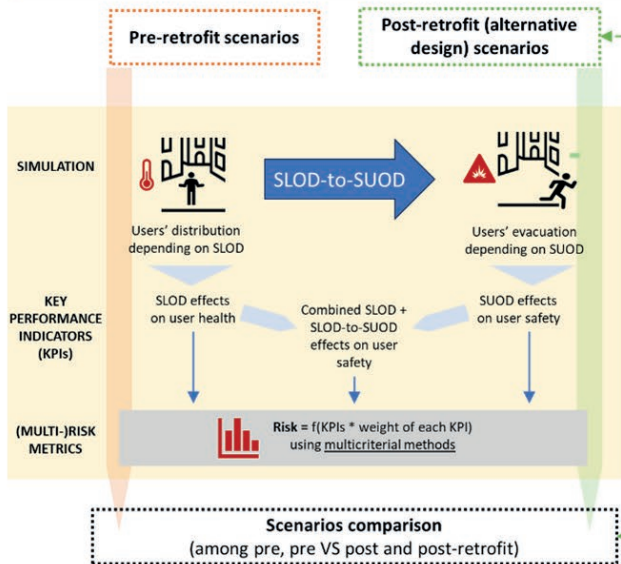
Basic principles

1 - Scenario creation

Real-world data collection



2 - Simulation-based evaluation



3 - Communication and engagement of stakeholders

'Feeding' GIS and BIM tools for data management and visualization



Virtual Reality and Serious Game for public training and involvement



User-centered, considering the combination of user vulnerability and exposure with user behavioral response in single and multi-risk UBE scenarios, also in view of mitigation strategies effect



Multi-scalar, to detect interactions affecting (Multi)-Risk and feed behavioral-based metrics for UBEs hot-spots detection, where to prioritize mitigation efforts. Data collection and analysis at micro (building), meso (open spaces, blocks, neighborhoods) and macro (whole UBE) scales inform models on use dynamics, disaster impacts and, thus, effectiveness of selected strategies, using easy-to-manage risk indicators



Typological-based, exploiting real input data to create recurring, idealized models at meso (open spaces archetypes) and macro (urban permeability, fabric organization) scales. These models can boost preliminary application and replicability by decision-makers depending on relevant key features and common scenario conditions



Oriented to single to multi-risk and thus dynamic, considering SLOD/SUOD timings, severity and cascade effects, along with risk-increasing conditions in UBE fruition by its users, e.g. mass gatherings. Beside single-risk multi-layer risk assessment techniques, "SLOD-to-SUOD" approaches are included, to analyse SUODs risks in a UBE where users already behave to respond to SLODs



Comparison-based, to (1) grade the impact of different scenarios in the same UBEs and (2) support decision-makers in selecting effective and sustainable strategies for single to multi-risk mitigation in the same context. Multicriterial metrics, weighting KPIs by their impact on (multi)-risk, and their normalization support scenarios comparison within or across UBEs



Participatory, using XR, GIS (Geographic Information System) and BIM (Building Information Modelling) to visualize multi-scale risk data, interact with scenarios, and raise awareness through interactive, user-centered disaster communication.



Creazione di scenari

La definizione degli scenari si basa sulla raccolta multiscala di dati e sulla loro organizzazione in banche strutturate, tramite strumenti come GIS (*Geographic Information System*) e BIM (*Building Information Modelling*). L'analisi di casi studio consente di individuare relazioni causa-effetto ricorrenti (es. linee narrative) e modelli tipologici orientati al rischio per gli UBE.

Raccolta ed elaborazione dati da casi reali

La raccolta dati avviene su più scale.

Alla macroscale, strumenti GIS permettono raccolta ed analisi rapida di parametri come quelli di morfologia urbana, caratteristiche geometriche, costruttive e funzionali degli edifici, pericolosità (es. aree alluvionali, zonazione sismica, clima urbano). I dati censuari integrano informazioni su esposizione (numero di residenti) degli utenti e vulnerabilità per età.

Alla meso e microscale, strumenti SCAN-TO-BIM (fotogrammetria ravvicinata, laser scanning, fotografia sferica) e rilievi remoti (Google Maps, Street View, ricerche web) forniscono dettagli sugli edifici (es. materiali, stato di conservazione/danno) e sulle funzioni ospitate, inclusi quelli sugli orari di apertura (per edifici pubblici, con variazioni giornaliere/stagionali). Quest'ultimo tipo di dato permette di stimare presenza e vulnerabilità degli utenti in condizioni ordinarie eccezionali (es. grandi eventi), anche associando densità di occupazione forniti dalle normative (antincendio, terrorismo) (Bernardini, Cantatore, *et al.*, 2025).

Inoltre, l'organizzazione di questi dati alla mesoscale consente di analizzare rapidamente le condizioni degli spazi aperti (stra-

de, piazze), dove gli utenti si muovono in caso di emergenza. Ad esempio, Figura 2 mostra l'andamento dei relativi scenari orari giornalieri per una piazza, dimostrandone la correlazione con l'uso dell'UBE analizzato.

Storylines e scenari "what-if"

La classificazione degli scenari in gruppi di condizioni simili consente di associarli a *storylines* (o *timelines*) di riferimento per l'emergenza (de Bruijn *et al.*, 2016). Le *storylines* aggregano dati relativi a caratterizzazione dell'UBE, fattori di rischio e strategie di mitigazione, strutturandoli in scenari di rischio singolo e multiplo, dalle situazioni non critiche fino a quelle di (quasi) collasso. Questo approccio mira a costruire narrazioni condivise su come SUOD, SLOD e loro combinazioni possano interagire ed evolvere nello spazio dell'UBE e nel tempo, secondo relazioni causa-effetto tra fattori. Attraverso alberi degli eventi, le linee narrative generano scenari "what-if", utili basi per decisioni informate e simulazione. Figura 3 mostra un esempio di *storylines* per rischio alluvione, in cui le condizioni dell'UBE (es. livelli di presenza di utenti) si articolano nei diversi livelli di allerta della Protezione Civile (verde, giallo, rosso). Sono inclusi anche gli effetti degli *early warnings*, in dipendenza dalla corretta ricezione da parte della popolazione, e le modalità con cui gli utenti li seguono, dalla fase di allerta all'evacuazione.

Tipologie di ambiente costruito (BET) come archetipi di scenari di (multi-)rischio

Oltre a *storylines* e scenari "what-if" tipologici, studi precedenti hanno dimostrato la possibilità di derivare Tipologie di Ambiente Costruito (BET - *Built Environment Typologies*), ovvero,

aggregation into (multi-)risk metrics. KPIs and metrics can guide decision-makers to select effective structural (physical interventions on UBEs) and non-structural (preparedness, management, planning) strategies, depending on their feasibility and impact.

The last phase involves communication and engagement of stakeholders, using results from previous stages to effectively inform both decision-makers (e.g., supplying local administrations and their technicians with structured visualisations of scenarios) and end-users (e.g., risk training for citizens, and their involvement). Different modelling tools, including eXtended Reality (XR), can increase process reliability.

Scenario creation

Scenario creation mainly exploits multiscale data collection and the organisation into structured databases, e.g.,

using GIS (Geographic Information System) and BIM (Building Information Modelling). Analysis data from several case-studies support the definition of recurring cause-effect relationships (e.g., *storylines*) and typological risk-oriented models of UBEs.

Collection and organisation of real-world data

Multi-scale data collection can first use GIS application at the macroscale, enabling rapid analysis of parameters on urban morphology; geometrical, constructive, vulnerability features of buildings; indoor and outdoor intended uses; general hazard features, and main risk sources (e.g., flood-prone areas, seismic zonation, urban climate, sensitive building targets). Adding census databases allows to trace basic user exposure (residents' number) and age-based vulnerability. Down

to microscale, data can be integrated by SCAN-TO-BIM tools from direct Close Range Photogrammetry, Terrestrial Laser Scanning, and spherical photography. Localised remote surveys (e.g., using Google Maps, Street View, updated photographic source, Web search) can be used especially in case of unavailable GIS databases, and always add specialised data, such as insights into building features (e.g., materials, conservation/damage state), and opening times affecting UBE use (for public functions, from hourly to seasonal variations). The microscale level can widely contribute to spatiotemporal assessment of user factors by simply considering safety regulations (i.e., fire, terrorism) to detect occupancy loads in ordinary and exceptional (mass gatherings) conditions (Gabriele Bernardini, Cantatore, *et al.*, 2025). In this sense, Figure 2 shows a

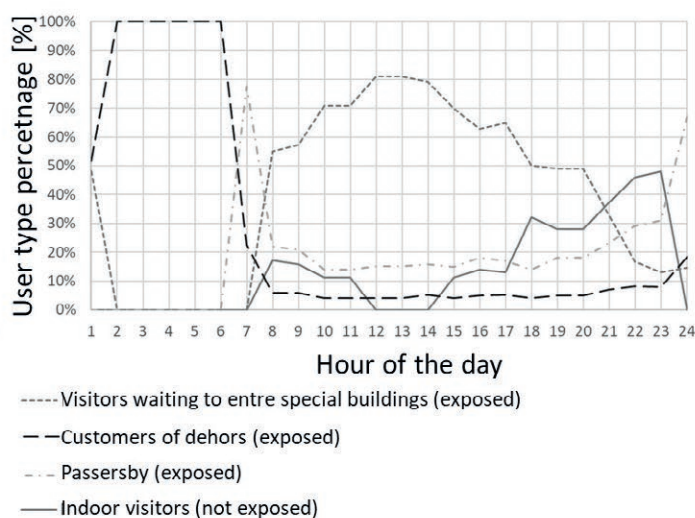
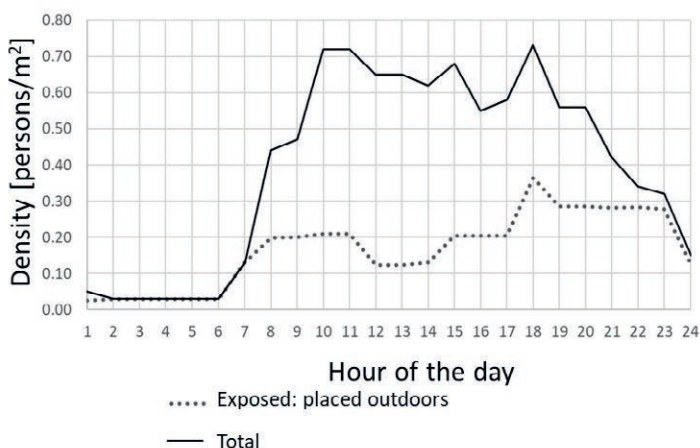
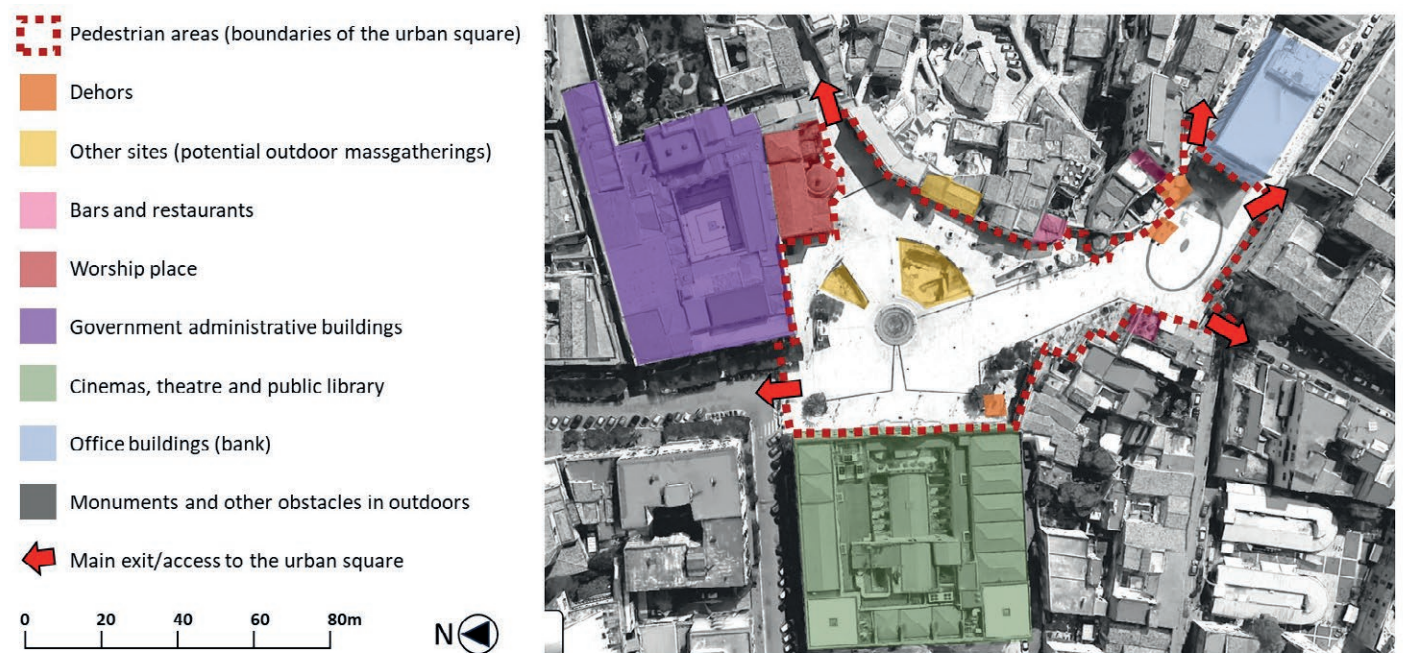
related example of typical daily time scenarios on user exposure, which depend on these UBE use conditions, demonstrating the relevance of user factors among collected inputs. Then, the mesoscale data organisation provides rapid spatiotemporal insights focusing on open spaces (streets, urban squares) where users move, live and behave in emergencies.

Storylines and "what-if" scenarios

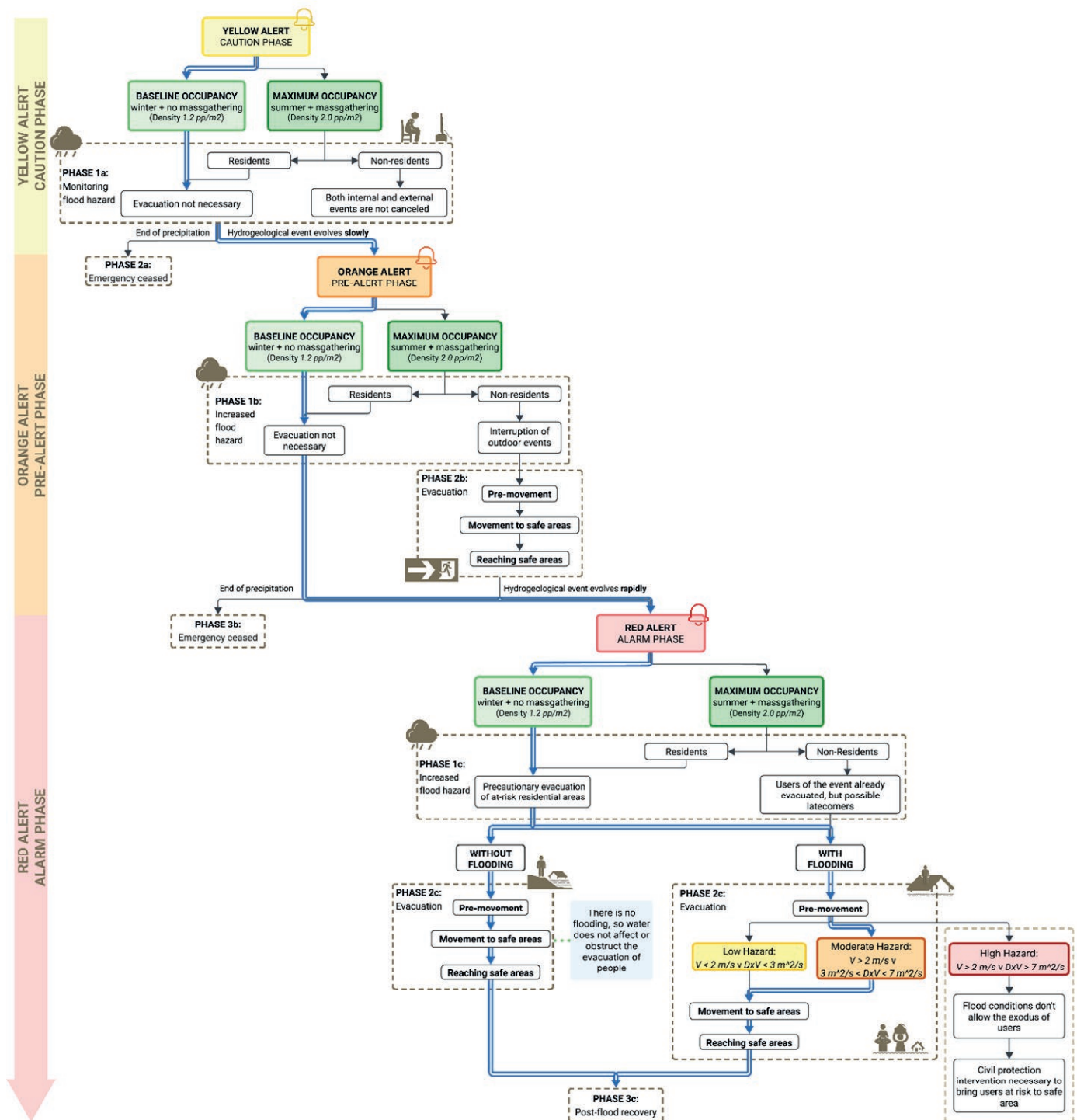
Gathering scenarios into groups of similar conditions allows to associate them with reference emergency *storylines*, or *timelines* (de Bruijn *et al.*, 2016). Each *storyline* aggregates input data on characterisation of UBE, risk factors, and mitigation strategies, and is structured into probable and relevant single and multi-risk scenarios, from no emergency to (near-)collapse ones. This organisation pursues the

attraverso analisi statistiche di condizioni ricorrenti di contesti reali (Bernardini, Sparvoli, *et al.*, 2025). Le BET rappresentano archetipi di UBE: i loro parametri descrittivi possono essere associati a UBE reali, permettendo valutazioni rapide, e senza necessità di rielaborazioni complete. Le BET possono quindi supportare i decision-makers nella fase preliminare di analisi, offrendo una lettura sintetica basata su caratteristiche comuni, che può essere successivamente affinata attraverso analisi specifiche e contestualizzate.

Per definire le BET, si analizzano parametri morfologici (es. geometria, edifici specializzati, permeabilità, quota altimetrica) da casi reali, per costruire rappresentazioni spaziali tipiche e ricorrenti. Le BET vengono poi arricchite con dati su vulnerabilità fisica e fattori legati agli utenti, approfondandone il dettaglio costruttivo, funzionale e *user-centred* in base a quantità e qualità di input per ogni descrittore. Il processo di clustering consente di raggruppare UBE reali in BET, organizzando i descrittori in indicatori attivi (di classificazione) e supplementari (per l'ar-



03 |



creation of common narratives on how SUODs, SLODs, SLODs-to-SUODs can interact and evolve over UBE space and time depending on cause-and-effect relationships between factors. Using event trees, storylines contribute to “what-if” scenarios, depending on the path followed by such interactions, offering valuable insights

for informed decision making and bases for simulations. Figure 3 shows an example of flood risk storyline in which UBE conditions (expressed occupancy conditions) have different branches in terms of alert levels (green, yellow, red) assigned by the Italian Civil Protection Service. It also includes the effects of early warnings

addressed (or not) to the population, and the way they are followed by users, from the alert phase to the evacuation process activation.

Built Environment Typologies as archetypes of (multi-)risk scenarios
 Besides typological scenarios/storylines, previous studies demonstrated

the ability to move from single real-world applications to Built Environment Typologies (BETs) (Gabriele Bernardini, Sparvoli, et al., 2025). BETs are archetypes of UBEs, built from statistical analysis of recurring real-world conditions. Hence, they trace basic conditions of different UBEs, which can be associated to

ricchimento dei modelli), selezionati, per gestire la complessità urbana e far convergere i modelli alla scala necessaria, tramite analisi preliminari di frequenza. Ogni parametro è rappresentato da un valore mediano, medio o modale, indicativo delle sue condizioni. A ciascuna BET può anche essere associata una propensione teorica a SUOD e SLOD.

Figura 4 mostra due esempi significativi di BET storiche riferite a una piazza urbana (Bernardini, Sparvoli, *et al.*, 2025) e a un quartiere (De Fino, Bernardini *et al.*, 2025), entrambe ottenute combinando dati GIS alla scala mesoscopica (morfologia degli spazi aperti) e microscopica (vulnerabilità, geometria e uso degli edifici).

Valutazione del (multi-)rischio tramite simulazione

selezionati, con l'obiettivo di fornire ai decision-makers metriche rapide sulla performance di sicurezza dell'UBE, nel suo insieme e nelle sue componenti (identificando aree prioritarie di intervento). I relativi modelli e strumenti devono quindi tracciare gli impatti comportamentali insieme ai parametri legati a pericolosità, vulnerabilità fisica e strategie di gestione e mitigazione (se presenti), secondo un approccio olistico.

Strumenti di simulazione

La presente ricerca adotta modelli ad agenti (ABM – *Agent-Based Models*) per la simulazione (Duan e Fei, 2025). Gli ABM associano regole a ciascun agente (elemento dell'UBE, utente, strategia), con interazioni reciproche in funzione della gravità

La simulazione può essere impiegata per analizzare condizioni di (multi-)rischio rispetto a *storylines* e scenari “*what-if*”

them, enabling rapid assessment by using replicable descriptors without full reanalysis. BETs support decision-makers with rapid preliminary assessments based on common features, and can be further refined through tailored analysis.

First, morphological parameters (e.g., geometry, specialised areas/buildings, permeability, elevation) are analysed to create spatial representations of typical UBEs. BETs are then enriched by physical vulnerability and user factors, increasing the level of detail to constructive, functional and behavioural dimensions depending on the quality of available inputs. A clustering process is then used to group real UBEs into BETs using active (used in clustering) and supplementary (used to enrich models) indicators selected through frequency analysis to manage the complexity of UBEs by converging

data and models at the needed scale. Each parameter is associated with a median/mean/modal value indicating its conditions. Rapid association with theoretical proneness to SLODs and SUODs is provided.

Figure 4 shows two relevant examples of historical BETs focused on a single urban square (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al.*, 2025), and on an urban neighbourhood (De Fino, Bernardini, *et al.*, 2025), using GIS input data to combine mesoscale (i.e., morphology of open spaces) with microscale (vulnerability, geometry and use of buildings) variables.

Simulation-based evaluation

Simulators and risk-sensitive models can be used to investigate (multi-)risk conditions in selected storylines and “what-if” scenarios with the main goal of supplying decision-makers with

del rischio definita nella *storyline*. Figura 5 mostra un ABM per il rischio terroristico, evidenziando tali interazioni e dipendenze (Bernardini, Cantatore *et al.*, 2025).

Gli ABM permettono la mappatura spaziale integrata del rischio, in particolare se abbinati ad automi cellulari che suddividono l'UBE in celle (Bernardini, Sparvoli *et al.*, 2025). In questo contesto, gli SLOD (es. UHI, inquinamento dell'aria) sono analizzati con simulazioni climatiche alla mesoscala, generando mappe di temperatura outdoor e qualità dell'aria su griglie da 1 a 5 m. La stessa griglia è usata per gli SUOD. Ad esempio, per il sisma, matrici di danno, basate su indicatori di vulnerabilità strutturale, permettono di stimare la profondità delle macerie. Per l'attentato terroristico, l'esposizione spaziale è valutata rispetto a posizione del target di attacco, accessibilità, affollamento e misure di prevenzione. L'ABM simula il comportamento degli utenti, localizzandoli secondo la risposta iniziale agli SLOD, per avviare la simulazione SUOD (esodo). Gli output includono quindi, per gli SLOD, gli effetti sulla salute, e, per gli SUOD, tempi di esodo SUOD, vittime e dinamiche di movimento della folla.

Metriche di (multi-)rischio per la valutazione di scenari pre e post-retrofit

Gli output delle simulazioni sono organizzati in KPI, che descrivono i singoli componenti del rischio e il loro impatto su scala microscopica (cella) e mesoscopica (spazio aperto). I KPI sono poi combinati tramite metodi di decisione multicriteriale, ponderando ciascun indicatore in base alla rilevanza attesa. L'integrazione con gli indicatori derivati dalla fase di creazione dello scenario consente di correlare parametri statici e dinamici

quick metrics focused on the UBE performance both as a whole, and by its composing parts (to define UBE hot-spots). Indeed, they should trace behavioural-based impacts along with parameters related to hazard, physical environment, and management issues, pursuing a holistic approach.

Simulation tools

This work adopts ABM (Agent-Based Models) for simulation purposes (Duan and Fei, 2025), since they associate rules for each agent (i.e., UBE element, user, strategy), with mutual interactions, also depending on storyline-based hazard severity. Figure 5 traces a graphical representation of an ABM developed for terrorism risk, using arrows to trace dependencies among agents (Gabriele Bernardini, Cantatore, *et al.*, 2025).

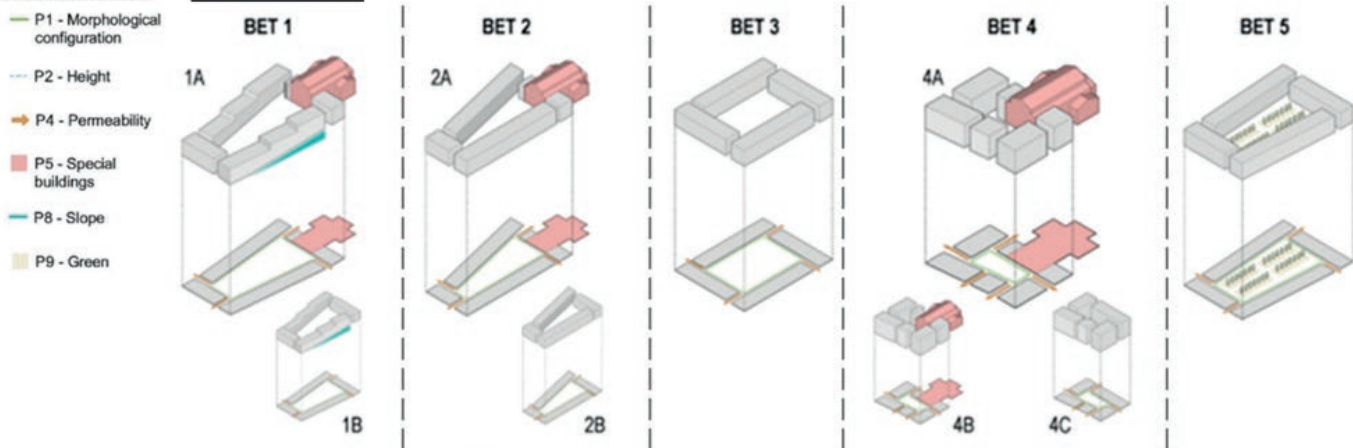
ABM first enables integrated spatial risk mapping, especially using cellular automata criteria, which divide the UBE into composing cells (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al.*, 2025). For instance, UHI and air pollution (SLODs) are modelled using mesoscale climate simulations, generating fine temperature and air quality maps on grids having a side length of 1m to 5m. The same grid is used for SUODs. Earthquakes are assessed through damage matrices based on structural vulnerability indicators, estimating debris depth, while terrorist risk relies on spatial exposure related to target position, accessibility, crowding, and prevention measures. Then, ABM simulates user behaviour and overlaps grids to locate users depending on a previously existing SLOD response to start an SUOD simulation. As an output, ABM predicts SLOD effects

04 | **BETs of HISTORIC URBAN SQUARES**

Database: more than 1100 Italian Urban squares in main historic cities (also in view of tourist flow)

Parameters:

Main clusters:



THEORETICAL PRONENESS TO RISKS (+)

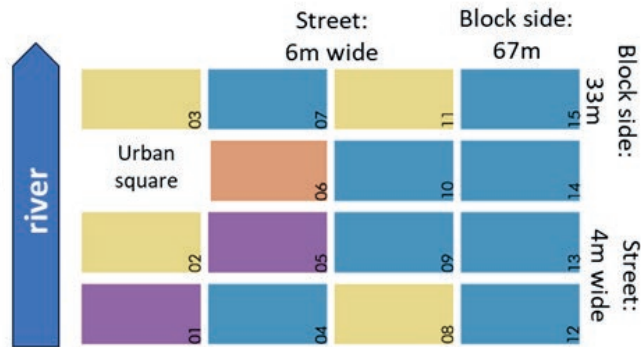
	BET 1A	BET 1B	BET 2A	BET 2B	BET 3	BET 4A	BET 4B	BET 4C	BET 5
SLOD									
Heat island	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Air pollution	+	+	+	+	+	-	-	-	-
SUOD									
Earthquake	-	-	+	+	-	+	+	+	-
Terrorist act	+	-	+	-	-	+	+	-	-

BETs of RIVERINE HISTORIC URBAN NEIGHBOHOOD

Database: more than 280 buildings and 60 blocks in the historic city of Senigallia (AN)

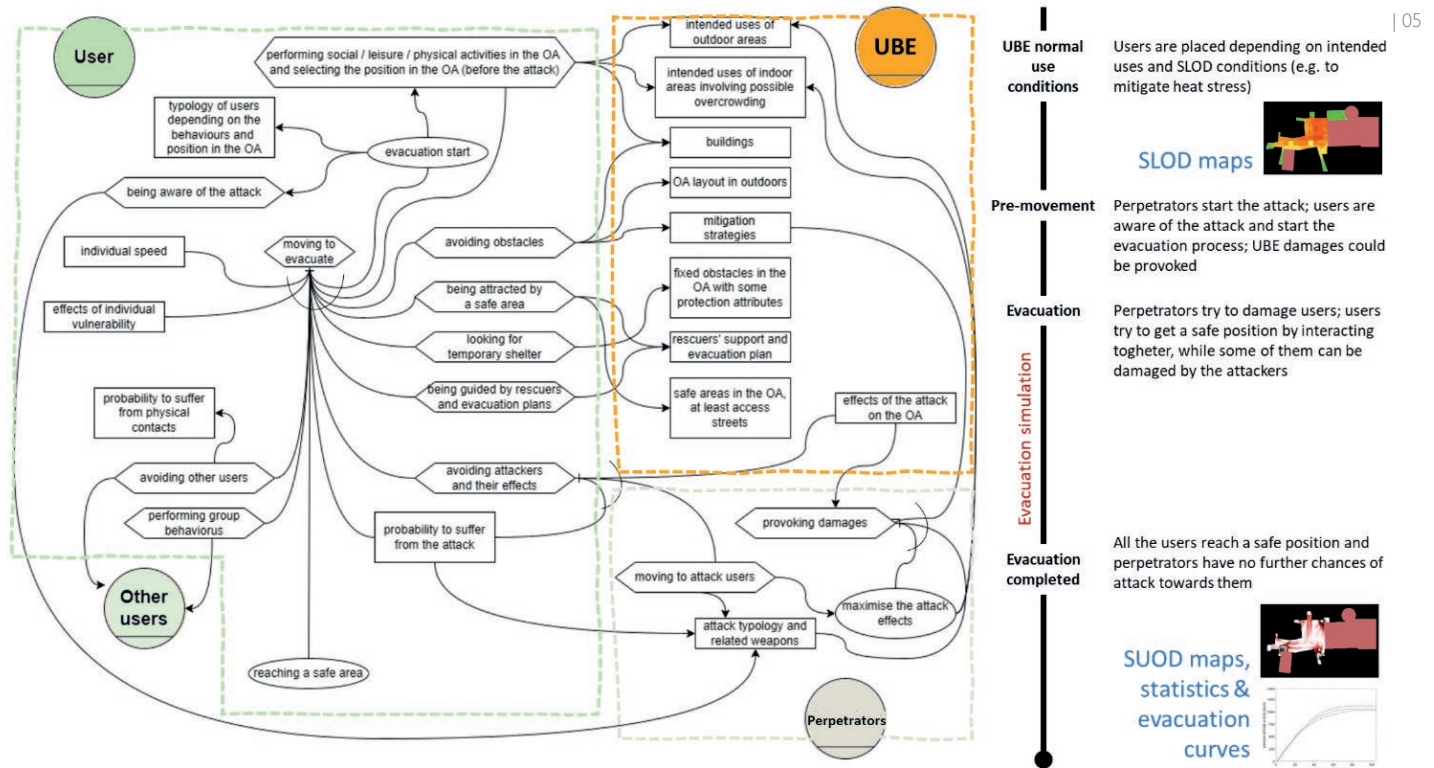
Parameters:

Block sides (geometry) and street width
Building vulnerability, materials, opening, conservation state, heritage value
Building intended use (ground and upper floors)
Sheltering area at the upper floors



Main clusters:





ci, arricchendo l'interpretazione di ciascun scenario di (multi-) rischio.

Le metriche includono KPI su SLOD (es. tasso di sudorazione per UHI, incidenza sulla salute per inquinamento), SUOD (es. rapporto tra macerie e superficie di movimento, 'resistere' degli accessi stradali, coefficiente di conservazione della velocità di esodo, livello di attrito con gli ostacoli, disponibilità di luoghi sicuri temporanei sicuri, rapporti di esposizione, livello di pro-

tezione degli ostacoli) e utenti (es. percentili di tempo e flusso di esodo, numero di contatti fisici/cadute, numero di utenti evacuati, numero di vittime). I KPI e le metriche sono normalizzati su scala 0–1 per confronti standardizzati, anche alla multiscale. Tali strumenti consentono anche la valutazione *post-retrofit* per valutare come strategie fisiche e gestionali implementate nell'UBE possano mitigare il (multi-)rischio rispetto ai livelli *pre-retrofit*, e quindi considerando lo stesso contesto e gli stessi utenti.

on user health, and SUOD evacuation times, casualties, and dynamic insights into crowd movement.

(Multi-)Risk metrics for quick evaluation of current and alternative scenarios

Simulation outputs are organised into KPIs, describing single risk factors and effects from micro (single map cell) to meso (open space) scale. Then, KPIs are combined using multicriterial decision making methods, which weight each KPI depending on expected risk relevance. Adding indicators from scenario creation tasks allows to match static and behavioural, dynamic parameters, thus enriching the interpretation of each (multi-)risk scenario. Metrics then incorporate one or more KPIs on SLOD (e.g., sweat rate for UHI, health affection rate for air pollution), SUOD (e.g., balance index of debris, road resis-

tor coefficient, pedestrian speed conservation, obstacle friction rate, temporary secure open spaces, exposure index, obstacle protection rate) and users (e.g., normalised evacuation time percentile, crowd effects as number of physical contacts/falls, mean flow rate at the exit, number of evacuees for SUOD from surrounding buildings, number of deaths/casualties). KPIs and metrics are defined to range from 0 (minimum) to 1 (maximum) risk, for multi-scale and standardised comparison purposes. The modelling of post-retrofit alternatives in simulation predictive tools then assess how physical measures and emergency management can mitigate single to multi-risk in the same context, for the same users, but into possible modified scenarios/storylines. Such mesoscale assessment relies on each open space in the UBE network, depending on local interactions. The

metrics are also arranged to point out macroscale hot-spots, and to provide multi-risk classification of whole/parts of UBE. Figure 6 traces a comparison between pre-retrofit and post-retrofit scenarios for UHI and terrorist acts, focused on a BET representing an urban square (Fig. 4) (Gabriele Bernardini, Sparvoli, *et al.*, 2025), which is ready to be further investigated through a case study-based analysis.

Communication and engagement of stakeholders

Results from previous assessment tasks converge towards (multi-)risk communication as a management strategy in preparedness and emergency response of different stakeholders, employing advanced digital tools for information modelling and immersive visualisation, and moving towards two directions.

The first, primarily targeted at expert users (technicians, decision/policy-makers), relies on a GIS-BIM-VR workflow from macroscale analysis of real UBEs to mesoscale modelling of BETs (i.e., squares, streets, buildings). The second, primarily targeted at non-expert users (citizens, associations), focuses on VR technologies in a SG (Serious Game) framework for abstract contexts, to train users on how to properly behave before, during and after emergency scenarios in a pervasive and engaging manner.

In both cases, the use of BETs allows several key objectives, including flexibility and replicability across multiple real contexts sharing similarities with the BETs; decoupling of VR experiences from concrete cases, which might otherwise generate over-sensitisation and alarmism among recipients; smooth functionality of digital solu-

Questa valutazione può essere efficacemente condotta alla mesoscala, comprendendo l'interazione locale in ogni spazio aperto dell'UBE. Le metriche risultanti permettono di individuare punti critici di rischio, e quindi prioritari per l'intervento all'interno della struttura dell'UBE, come pure di classificare il rischio complessivo o parziale dell'UBE, alla macroscale. Figura 6 mostra un esempio di confronto tra scenari *pre* e *post-retrofit* per combinazione di UHI e atti terroristici, riferiti a una BET rappresentativa di piazza urbana (Fig. 4), utile a supportare ulteriori analisi su casi studio (Bernardini, Sparvoli *et al.*, 2025).

Comunicazione e coinvolgimento degli stakeholders

I risultati dei precedenti step di creazione di scenari e di valutazione del (multi-)rischio convergono nelle azioni di comunicazione e coinvolgimento dei diversi stakeholders, intese come strategie gestionali nelle fasi di preparazione e risposta all'emergenza, attraverso l'impiego di strumenti digitali avanzati per la modellazione informativa e la visualizzazione immersiva. Tale approccio si articola lungo due principali direttrici operative.

La prima, rivolta a utenti esperti (tecnici, decisori, amministratori), si basa su un flusso GIS-BIM-VR che va dall'analisi su macroscale di UBE reali alla modellazione su mesoscale di BET. La seconda, indirizzata a utenti non esperti (cittadini, associazioni), si concentra su tecnologie VR in ambienti SG (*Serious Game*) per contesti astratti, finalizzati alla formazione comportamentale prima, durante e dopo scenari di emergenza, in modo pervasivo e coinvolgente.

In entrambi i casi, l'uso delle BET consente di perseguire obiettivi di: flessibilità e replicabilità in contesti reali analoghi; di-

saccoppiamento delle esperienze VR dai casi concreti, evitando sovra-sensibilizzazione e allarmismo; fluidità operativa delle soluzioni digitali, riducendo il carico computazionale derivante dalla modellazione di scenari complessi.

Integrare strumenti GIS e BIM per gestire e visualizzare i dati

Come evidenziato nella raccolta ed elaborazione dei dati in casi reali, la gestione e visualizzazione multiscale inizia con una fase preliminare in ambiente GIS, utile ad armonizzare dati statici (es. vulnerabilità di sistemi e sottosistemi edilizi) e dinamici (es. occupazione indoor e outdoor). Ad esempio, nel caso del rischio alluvione (De Fino, Bernardini *et al.*, 2025), gli scenari di pericolo (profondità e velocità dell'acqua) sono stati correlati con caratteristiche morfo-tipologiche e materico-costruttive che determinano la suscettibilità degli edifici all'ingresso dell'acqua (es. aperture, dislivelli ai piani terra/interrati, permeabilità di infissi e finiture opache, sistema strutturale, stato di conservazione). Questi dati sono stati integrati con le condizioni di occupazione alle funzioni (residenze, edifici pubblici, spazi esterni, aree di aggregazione), che influenzano numero, tipologia e distribuzione spazio-temporale degli utenti potenzialmente coinvolti nell'evacuazione verso piani superiori e/o area di raccolta.

Questa fase risponde a tre funzioni principali: costruire una banca dati strutturata secondo ontologie standardizzate, anche per elaborazioni specialistiche; localizzare le aree più critiche dell'UBE tramite la combinazione di fattori e metriche sopra citati; supportare l'analisi cluster delle tipologie UBE più ricorrenti per la modellazione microscopica. In particolare, la modellazione BIM ha integrato i risultati dell'analisi cluster e descritto le tipologie di edifici e spazi aperti, discretizzandoli

tions, reducing computational loads stemming from complex scenario modelling.

'Feeding' GIS and BIM tools for data management and visualisation

As pointed out in data collection and management in real cases, multi-scalar management and visualisation can first exploit an initial GIS-based phase to centralise and harmonise both (multi-)risk static (e.g., vulnerability of building systems and subsystems) and dynamic (e.g., indoor and outdoor occupancy) data of the UBE. For instance, in flood risk (De Fino, Bernardini, *et al.*, 2025), hazard scenarios (water depth and speed) were cross-related with morpho-typological and material-constructive features determining building susceptibility to water ingress (e.g., openings, level differences at ground floors, basements,

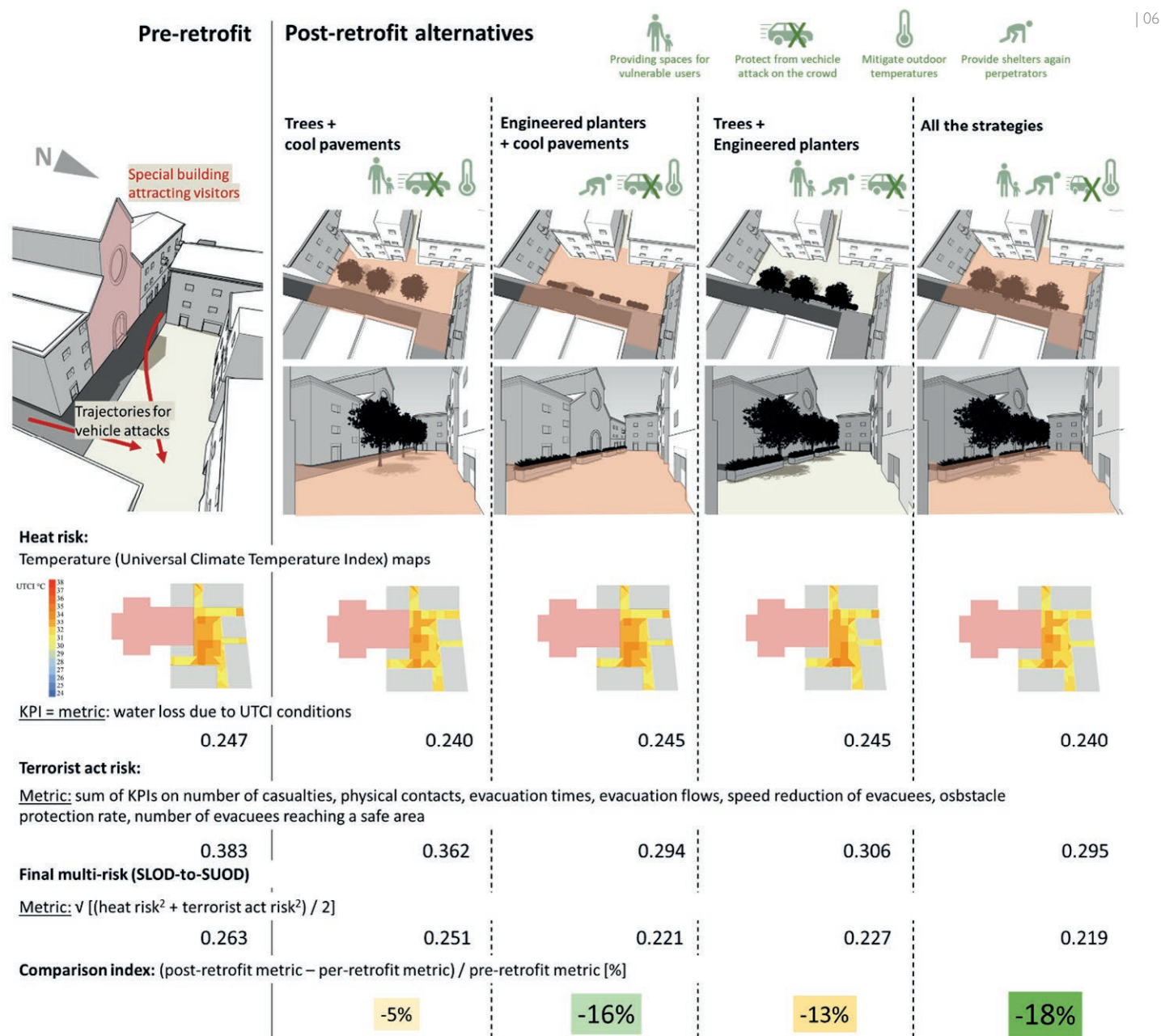
permeability of windows and opaque finishes, structural system, conservation state). These data were further integrated with occupancy conditions depending on hosted uses (residences, public buildings and outdoor spaces, mass gathering areas), which influence spatiotemporal number, type, and distribution of users potentially involved in flood evacuation (moving towards upper floors and/or assembly points). This phase fulfils three main functions, precisely establishing a database structured according to standardised ontologies, also in view of case-oriented expert elaborations; locating riskiest areas within the UBE through the combination of the aforementioned factors and of simulation-based metrics too; supporting cluster analysis on most recurrent building typologies for microscale modelling. In particular, BIM-based modelling integrated

cluster analysis results and described building and open space types, discretised to the minimum analysis unit of risk factors (e.g., the technological element "window frame" for vertical transparent closure permeability). Each element is enriched with standardised descriptors (e.g., "frame material type") and linked to computational rules for assigning weights and generating specific KPIs. Furthermore, this approach supported the automation of workflows for querying data and visualising parameters and indicators in VR environments through colour maps pre-associated with risk ranges (Fig. 7).

Virtual Reality and Serious Game for public training and involvement

Virtual training of users on behaviours to be adopted before, during, and after emergencies, also in spatial and/or

temporal combination, relies on the SG and fulfils an educational function through entertainment, ensuring relevant effectiveness and long-term retention (Baraldo and Di Giuseppantonio Di Franco, 2024). To this end, it employs interactive dynamics of scenario visualisation, action demonstration, and behavioural response simulation. VR-SG solutions were developed to provide engaging experiences under controlled and safe conditions, integrating recommendations issued by institutional risk protection and management bodies with additional information from the phenomenological and behavioural analyses previously described. For example, in multi-risk scenarios about UHI and earthquakes (De Fino, Cassano, *et al.*, 2025), the immersive VR environment was designed for VR headsets as a set of training/game modules, addressing: (1) use



of protective elements for UHI (e.g., shaded areas, greenery, water bodies); (2) evacuation from sources of danger during earthquakes (e.g., electrical devices, debris, breakable objects). This narrative was supported by maps and animations resulting from rigorous analytical simulations of UTCI distribution in open spaces and falling debris, as well as agent-based evacuation models (Fig. 8). All developed solutions underwent careful evaluation of user effectiveness and usability, also in comparison with

more traditional tools, through testing protocols and feedback collection. Beyond training for ex-ante scenarios, they are also regarded as promising for ex-post communication of mitigation solutions, in view of participatory stakeholder consultation (Simonofski, Johannessen and Stendal, 2024).

Final remarks

Considering how users respond and behave in disaster scenarios, single and multi-risk scenarios have to be faced in historic UBE to ensure effective solu-

tions. This research, built on the experience of projects BE S2ECURE and ReACT, innovatively addresses risk assessment holistically by integrating dynamic factors (related to user behaviour and spatiotemporal variability of UBE occupancy) into the otherwise static evaluations of the physical vulnerability to hazards. This user-centred perspective is also applied in the development of digital solutions for visualisation, management, and communication of scenarios and strategies, targeting both expert and non-expert

stakeholders. Moreover, the proposed typological approach not only ensures broad replicability of the results, but also detaches evaluations and recommendations from real-world cases, thus avoiding potential over-sensitisation of local populations. Future works can then apply the approach to several contexts and provide relevant insights for decision-makers and managing authorities through digital solutions for visualising risk factors, impacts, and mitigation strategies, as well as for the general public (citizens and historic

all'unità minima di analisi dei fattori di rischio (es. l'elemento tecnologico "infixo" per la permeabilità delle chiusure trasparenti verticali). Ogni elemento è stato arricchito con descrittori standardizzati (es. "tipologia di materiale del telaio") e collegato a regole computazionali per l'attribuzione di pesi e la generazione di KPI specifici. Inoltre, tale approccio ha supportato l'automazione dei flussi operativi per l'interrogazione dei dati e la visualizzazione di parametri e indicatori in ambienti VR, tramite mappe cromatiche pre-associate a intervalli di rischio (Fig. 7).

Realtà Virtuale e Serious Game per il training e il coinvolgimento degli utenti

La formazione in VR degli utenti sui comportamenti da adottare prima, durante e dopo un'emergenza, anche in combinazione spaziale e/o temporale, si basa sull'approccio SG, che assolve una funzione educativa attraverso l'intrattenimento, garantendo efficacia e memorizzazione nel lungo periodo (Baraldo e Di Giuseppantonio Di Franco, 2024). A tal fine, vengono impiegate dinamiche interattive di visualizzazione degli scenari, dimostrazione delle azioni e simulazione comportamentale.

Le soluzioni VR-SG sono state sviluppate per offrire esperienze coinvolgenti in condizioni controllate e sicure, integrando le raccomandazioni degli enti istituzionali preposti alla protezione e gestione del rischio con informazioni aggiuntive derivate dalle analisi fenomenologiche e comportamentali precedentemente descritte. Ad esempio, in scenari di multi-rischio legati a UHI e sisma (De Fino, Cassano *et al.*, 2025), l'ambiente immersivo è stato progettato per visori VR come insieme di moduli formativi/ludici, dedicati a: (1) uso di elementi protettivi per UHI (es. zone d'ombra, vegetazione, specchi d'acqua); (2) evacuazione da

fonti di pericolo durante il sisma (es. dispositivi elettrici, macerie, oggetti fragili). La narrazione è supportata da mappe e animazioni ottenute da simulazioni analitiche sulla distribuzione di temperatura outdoor, caduta dei detriti, e ABM per l'esodo.

Tutte le soluzioni sono state validate per efficacia e usabilità, anche rispetto a strumenti tradizionali, tramite protocolli di test e raccolta di feedback. Oltre alla formazione ex-ante, tali strumenti sono promettenti anche per la comunicazione esposta delle soluzioni di mitigazione, in ottica di consultazione partecipata (Simonofski, Johannessen e Stendal, 2024).

Conclusioni

Gli scenari di rischio singolo e multiplo negli UBE storici devono essere affrontati considerando le modalità con cui gli utenti reagiscono e si comportano in situazioni di emergenza, per rendere le soluzioni il più efficaci possibile. Questa ricerca, sviluppata nei progetti BE S2ECURE e ReACT, propone un approccio innovativo alla valutazione del rischio, integrando fattori dinamici e comportamenti degli utenti nelle tradizionali analisi statiche su vulnerabilità fisica e pericolosità. Questa prospettiva centrata sull'utente è applicata anche allo sviluppo di soluzioni digitali per la visualizzazione, gestione e comunicazione di scenari e strategie, rivolte sia a stakeholder esperti che non esperti. Inoltre, l'approccio tipologico proposto garantisce ampia replicabilità dei risultati e consente di svincolare valutazioni e raccomandazioni dai casi reali, evitando fenomeni di sovra-sensibilizzazione delle popolazioni locali. Le future applicazioni potranno estendere il metodo a diversi contesti, offrendo strumenti digitali e integrati per autorità competenti e popolazione, attraverso percorsi formativi in VR e comunicazione partecipativa.

UBE visitors) through VR training and participatory communication in emergency situations.

ATTRIBUTION, ACKNOWLEDGMENTS, COPYRIGHT

This work has been supported by the projects:

- BE S2ECURE ("Built Environment Safer in Slow and Emergency Conditions through behaviour assessed/ designed Resilient solutions" - Grant number: 2017LR75XK, funded by MIUR within PRIN 2017) - coordinator: prof. E. Quagliarini; Research units: Università Politecnica delle Marche, Politecnico di Bari, Roma La Sapienza, Università di Perugia, Politecnico di Milano;

- ReACT ("Resilient urban and metropolitan built environments through inclusive multi-risk behavioural-based models and simulations", funded

by PNRR), ReACT ("(planning) Resilient urban and metropolitan built environments through inclusive multi-risk behavioural-based models and simulations", project code PE00000005, CUP E63C22002000002 - funded under the National Recovery and Resilience Plan (NRRP), Mission 4 Component 2 Investment 1.3 ('Partenariati estesi alle università, ai centri di ricerca, alle aziende per il finanziamento di progetti di ricerca di base') funded by the European Union - NextGenerationEU, Italian Ministry of University, according to the Call for tendered "Decreto Direttoriale No. 341 of 15/3/2022", Project "Multi-Risk science for resilient communities under a changing climate (RETURN)", code PE00000005 - CUP, Concession Decree (Decreto Direttoriale) No. 1552 of 11/10/2022, within the "BANDO a CASCATA" of Spoke 5 TS1 "Insedia-

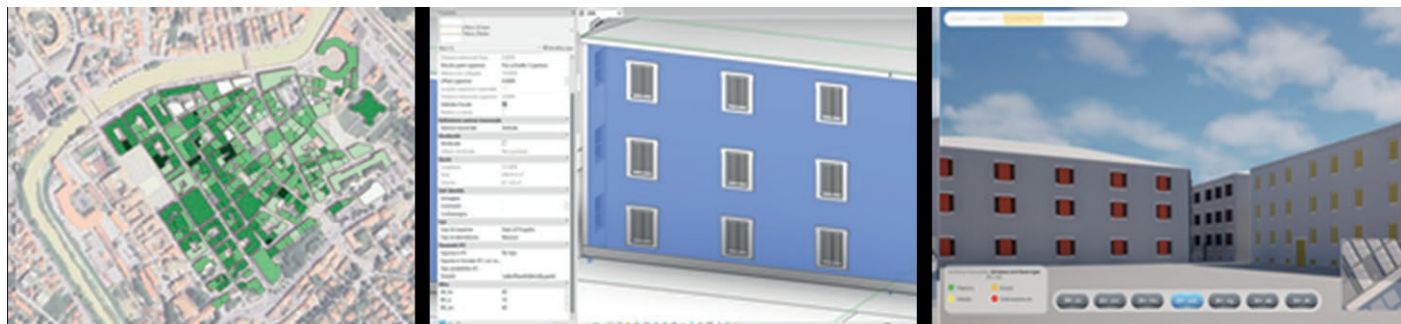
menti Urbani e Metropolitani", with relation to the ReACT Concession Decree (Decreto Rettoriale di concessione del finanziamento) DR/2025/107 of 13/01/2025 from Università Federico II di Napoli as Spoke - coordinator: prof. E. Quagliarini; Research units: Università Politecnica delle Marche, Politecnico di Bari.

07 | Esempio di prodotti del flusso GIS-BIM-VR. Mappatura indice normalizzato di vulnerabilità edilizia (QGIS®), attribuzione parametrica dei descrittori e dei pesi di vulnerabilità edilizia (Autodesk Revit®) e relativa visualizzazione in scala cromatica. (Epic Unreal®)

Example of GIS-BIM-VR workflow outcomes. From left: Normalised building vulnerability index mapping (QGIS®), parametric attribution of descriptors and vulnerability weights (Autodesk Revit®), and corresponding chromatic scale visualisation (Epic Unreal®)

08 | esempio di costruzione di soluzione VR-SG per rischio da ondate di calore e sisma. Da sinistra: modello da grafica computerizzata (MAXON Cinema4D®), integrazione VR di mappe tematiche UTCI integrate (ENVI-met®) e ambiente simulativo (Unreal Engine®)

Example of VR-SG solution development for UHI and earthquake risk. From left: computer graphics model (MAXON Cinema4D®), VR integration of UTCI maps (ENVI-met®), simulation environment (Unreal Engine®)



| 07



| 08

REFERENCES

- An, Q. and Ochiai, C. (2025), "Urban morphology and disaster risk reduction: A systematic literature review", *Progress in Disaster Science*, 27, p. 100455. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2025.100455>.
- Baraldo, M. and Di Giuseppantonio Di Franco, P. (2024), "Place-centred emerging technologies for disaster management: A scoping review", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 112, p. 104782. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104782>.
- Bernardini, G., Sparvoli, G., et al. (2025), "Evaluating strategies for single to multi-risk mitigation in urban public open spaces: A behavioural simulation-based approach applied to Italian typological historical urban squares", *Cities*, 166, p. 106267. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2025.106267>.
- Bernardini, G., Cantatore, E., et al. (2025), *Terrorist Risk in Urban Outdoor Built Environment*. 1st edn. Singapore: Springer Nature Singapore (SpringerBriefs in Architectural Design and Technology). Available at: <https://doi.org/10.1007/978-981-97-6965-0>.
- de Bruijn, K.M. et al. (2016), "The storyline approach: a new way to analyse and improve flood event management", *Natural Hazards*, Vol. 81(1), pp. 99-121. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-2074-2>.
- Curt, C. (2021), "Multirisk: What trends in recent works? – A bibliometric analysis", *Science of The Total Environment*, 763, p. 142951. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142951>.
- Duan, X. and Fei, W. (2025), "Assessment of the Impact of Temporal and Spatial Factors on the Emergency Evacuation Capacity of External Spaces in High-Density Urban Communities during Earthquake Disasters", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, pp. 105760. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105760>.
- De Fino, M., Bernardini, G., et al. (2025), "Flood Risk Management in Historic Centres: A Scalable Typological Framework Integrating GIS, Bim and Vr", *SSRN Electronic Journal* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.2139/ssrn.5375831>.
- De Fino, M., Cassano, F., et al. (2025), "On the user-based assessments of virtual reality for public safety training in urban open spaces depending on immersion levels", *Safety Science*, 185, pp. 106803. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2025.106803>.
- Julià, P.B. and Ferreira, T.M. (2021) "From single- to multi-hazard vulnerability and risk in Historic Urban Areas: a literature review", *Natural Hazards*, Vol. 108(1), pp. 93-128. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04734-5>.
- Polese, M. et al. (2024), "Multi-risk assessment in transboundary areas: A framework for harmonized evaluation considering seismic and flood risks", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 101, pp. 104275. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104275>.
- Sharifi, A. (2019), "Urban form resilience: A meso-scale analysis", *Cities*, 93, pp. 238–252. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.05.010>.
- Simonofski, A., Johannessen, M.R. and Stendal, K. (2024), "Extended reality for citizen participation: A conceptual framework, systematic review and research agenda", *Sustainable Cities and Society*, Vol. 113, pp. 105692. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105692>.