

Cristina Visconti, <https://orcid.org/0000-0003-3773-254X>

Martina Bosone, <https://orcid.org/0000-0001-8478-5906>

Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia

cristina.visconti@unina.it

martina.bosone@unina.it

Abstract. Le tradizionali valutazioni di vulnerabilità spesso si rivolgono a singoli pericoli, trascurando le interdipendenze sistemiche che caratterizzano le città come sistemi socio-ecologici-tecnologici (SETS). Il presente studio avanza il concetto di vulnerabilità sistemica proponendo un quadro multidimensionale che integra le dimensioni fisica, sociale, economica ed ecologica. La ricerca applica una revisione strutturata della letteratura per identificare i criteri e gli indicatori chiave che influenzano la vulnerabilità sistemica. Partendo da questi risultati, si delinea lo sviluppo di un Indice di Vulnerabilità Climatica (CVI), incentrato sullo stress provocato dalle ondate di calore come caso applicativo. I risultati riflettono tre dimensioni fondamentali che catturano la complessità della vulnerabilità sistemica e sottolineano la necessità di approcci integrati per supportare la pianificazione adattiva e le valutazioni spaziali basate su sistemi GIS, affrontando gap critici nella resilienza urbana.

Parole chiave: Vulnerabilità sistemica; Resilienza urbana; Sistemi socio-ecologici-tecnologici; Quadro di valutazione multicriteriale; Indicatori multidimensionali.

Multidimensionalità della vulnerabilità urbana e pensiero sistemico

discipline spaziali, sollevando domande critiche su come ridurre contestualmente le vulnerabilità e migliorare la resilienza attraverso l'applicazione di un pensiero sistemico (Cutter, 2021). Le città, in quanto sistemi complessi e dinamici, si trovano a dover fronteggiare le crescenti sfide poste dal cambiamento climatico, un fattore di pressione sempre più urgente che si somma a minacce già esistenti, quali i rischi geomorfologici e l'inquinamento.

Il pensiero sistemico permette di interpretare gli insediamenti urbani come sistemi interconnessi, articolati in sottosistemi

Il rischio di catastrofi urbane incontra un interesse crescente sia nella ricerca, che nel contesto politico e della pratica delle

fisici, sociali, economici, istituzionali ed ecologici. La natura e la distribuzione del rischio urbano sono il risultato delle interazioni dinamiche e dell'interdipendenza tra tali componenti. In questo quadro, la vulnerabilità è da tempo riconosciuta come una dimensione centrale del rischio, sebbene venga concettualizzata in modi differenti a seconda delle discipline di riferimento (Adger, 2006; Füssel, 2010; Blaikie *et al.*, 2014). La vulnerabilità urbana, in particolare, si configura come una condizione multidimensionale che riflette la propensione degli elementi esposti a subire effetti negativi in molteplici ambiti: spaziali, fisici, tecnici, sociali, economici, ambientali, culturali e istituzionali (Gunaratne *et al.*, 2023; Limongi and Galderisi, 2022). Essa scaturisce da complessi processi socio-ecologici e socio-tecnici, alla base di fattori di rischio che emergono dall'intreccio tra attori sociali, dinamiche economiche e condizioni ambientali (Sharifi, 2023; Schneiderbauer *et al.*, 2017).

In contesti multirischio, la vulnerabilità sistemica è emersa come un concetto cruciale ma ancora poco approfondito sia nell'ambito dell'adattamento ai cambiamenti climatici (CCA) sia in quello della riduzione del rischio di disastri (DRR). Diversamente dagli approcci tradizionali, che tendono a considerare i pericoli in maniera isolata, la prospettiva della vulnerabilità sistemica mette in evidenza le interdipendenze tra i sottosistemi urbani e la loro suscettibilità a guasti a cascata, inquadrando le città come sistemi socio-ecologico-tecnologici (SETS). Tale approccio riconosce che le aree urbane sono esposte non solo a molteplici pericoli, ma anche alle loro interazioni con fragilità sociali, economiche, culturali e fisiche preesistenti (Gill and Malamud, 2014).

Towards a methodology for assessing urban systemic vulnerability

Abstract. Traditional vulnerability assessments often address single hazards, overlooking the systemic interdependencies that characterise cities as socio-ecological-technological systems (SETS). This study advances the concept of systemic vulnerability by proposing a multidimensional framework integrating physical, social, economic, and ecological dimensions. The research applies a structured literature review to identify key criteria and indicators influencing systemic vulnerability. Building on these findings, we outline the development of a Climate Vulnerability Index (CVI), focusing on urban heat stress as a case application. Results reveal three core dimensions that capture the complexity of systemic vulnerability and underscore the need for integrated approaches to support adaptive planning and GIS-based spatial assessments, addressing critical gaps in urban resilience.

Keywords: Systemic vulnerability; Urban resilience; Socio-ecological-technological systems; Multi-criteria evaluation framework; Multidimensional indicators.

Urban vulnerability multidimensionality and systemic thinking

Urban disaster risk has increasingly attracted attention in research, policy, and practice, raising critical questions on how to contextually reduce vulnerabilities and enhance resilience through systemic thinking (Cutter, 2021). Cities, as complex and dynamic systems, face mounting challenges from climate change—an urgent stressor that compounds existing threats such as geomorphological hazards, biological risks, and pollution.

Systemic thinking enables an understanding of urban settlements as interconnected systems comprising physical, social, economic, institution-

al, and ecological subsystems. These interdependent components and their dynamic interactions shape the nature and distribution of urban risk. In this context, vulnerability is recognised as an essential dimension of risk, although it takes different forms in various disciplines (Adger, 2006; Füssel, 2010; Blaikie *et al.*, 2014). International literature converges in defining it as one of the three constituent components of risk, together with hazard and exposure, which contribute to the estimation of potential impacts in urban systems. This approach, formalised by the IPCC and widely accepted in scientific and operational circles, conceives risk as the result of the interaction between hazard, exposure and vulnerability (IPCC 2022; Estoque *et al.*, 2023; Stolte *et al.*, 2024).

Urban vulnerability is multidimensional, reflecting the propensity of

I modelli convenzionali di vulnerabilità si riferiscono generalmente a singoli pericoli, mentre i quadri concettuali multirischio considerano anche gli effetti composti e a cascata che possono compromettere la resilienza (Cutter, 2016; Mohammadi *et al.*, 2024). In condizioni multirischio, la vulnerabilità riflette il grado in cui le componenti urbane – abitazioni, infrastrutture, economia e comunità – risultano suscettibili di subire danni derivanti da pericoli interconnessi. La vulnerabilità urbana, in questo senso, è definita come la misura in cui città, popolazioni, infrastrutture ed economie sono esposte a fattori di stress quali ondate di calore, inondazioni o instabilità politica, aggravati dalla capacità limitata di gestire o assorbire gli impatti (Gencer *et al.*, 2018; Revi *et al.*, 2014; Romero-Lankao *et al.*, 2014).

Le valutazioni della vulnerabilità assumono un ruolo determinante nell'identificare popolazioni e sistemi maggiormente a rischio, orientando l'allocazione di risorse e interventi – siano essi strategie di adattamento nell'ambito della CCA o misure di preparazione nell'ambito della DRR (Birkmann *et al.*, 2015). Valutazioni accurate si rivelano pertanto essenziali per affrontare le cause strutturali della vulnerabilità e favorire sinergie tra CCA e DRR (Birkmann, 2006). Nonostante ciò, gli strumenti capaci di cogliere in modo sistemico la complessità della vulnerabilità urbana restano limitati, lasciando un vuoto significativo nella ricerca. Questo studio affronta questa lacuna presentando i risultati intermedi del task 5.3.3 del Partenariato Esteso “Return, *Multi-risk Science for Resilient Communities under a Changing Climate*”, focalizzato sulla vulnerabilità sistemica. In particolare, viene proposto un quadro multidimensionale per operationalizzare la vulnerabilità sistemica in ambito urbano, a supporto di strategie di progettazione e pianificazione integrate, adattive

e trasformative. Sulla base di una revisione della letteratura, viene sviluppato un approccio basato su indicatori, con l'obiettivo di identificare i criteri che influenzano in senso positivo o negativo la vulnerabilità sistemica. Il contributo illustra nel dettaglio le dimensioni e i criteri alla base del quadro concettuale e introduce lo sviluppo di un Indice di Vulnerabilità Climatica (CVI), applicato inizialmente alla valutazione della vulnerabilità urbana alle ondate di calore.

La struttura del lavoro è organizzata in più sezioni tra loro complementari. La sezione metodologica illustra la revisione della letteratura condotta secondo il metodo PRISMA, unitamente agli strumenti analitici impiegati per la valutazione della vulnerabilità sistemica. Successivamente, la sezione dei risultati identifica e sintetizza le dimensioni e i criteri chiave, che costituiscono la base per una discussione approfondita delle tre dimensioni centrali nello sviluppo dell'Indice di Vulnerabilità Climatica. Il contributo si conclude offrendo una prospettiva orientata al futuro sull'implementazione dell'indice e sulla sua integrazione nella modellazione basata su GIS all'interno di un caso studio selezionato.

Metodologia

Un'analisi preliminare dello stato dell'arte sulla vulnerabilità sistemica degli insediamenti urbani evidenzia come i quadri concettuali esistenti presentino notevoli differenze in termini di scala, dimensioni e strumenti, spaziando da indici qualitativi fino ad approcci basati su modellizzazione e simulazione. A partire da queste considerazioni, il presente studio rivede criticamente la letteratura scientifica sulla vulnerabilità sistemica, con un'attenzione specifica ai modelli e agli strumenti impiegati

exposed elements to suffer adverse effects across spatial, physical, technical, social, economic, environmental, cultural, and institutional domains (Gunaratne *et al.*, 2023; Limongi and Galderisi, 2022). These vulnerabilities stem from complex socio-ecological and socio-technical processes—underlying risk drivers involving interactions among social actors, economic dynamics, and environmental conditions (Sharifi, 2023; Schneiderbauer *et al.*, 2017).

In multi-risk contexts, systemic vulnerability has emerged as a critical yet underexplored concept within both Climate Change Adaptation (CCA) and Disaster Risk Reduction (DRR). Unlike traditional approaches that isolate single hazards, systemic vulnerability emphasises interdependencies among urban subsystems and their susceptibility to cascading failures,

framing cities as socio-ecological-technical systems (SETS). This perspective recognises that urban areas are exposed not only to multiple hazards but also to their interactions with previously existing social, economic, cultural, and physical fragilities (Gill and Malamud, 2014).

Conventional vulnerability models mostly refer to individual hazards, while multi-risk frameworks also include compound effects that can compromise resilience (Cutter, 2016; Mohammadi *et al.*, 2024). Under such conditions, vulnerability expresses the degree of susceptibility of urban components – housing, infrastructure, economy and community – to damage resulting from interconnected hazards and the limitations of their capacity to manage, adapt to or absorb impacts (Gencer *et al.*, 2018; Revi *et al.*, 2014; Romero-Lankao *et al.*, 2014).

Vulnerability assessments play a crucial role in identifying the most at-risk populations, systems and urban areas, guiding the allocation of resources and interventions—whether adaptive strategies in CCA or preparedness measures in DRR (Birkmann *et al.*, 2015). Accurate assessments are essential for tackling root causes of vulnerability and fostering synergies between CCA and DRR (Birkmann, 2006). However, tools capable of capturing the systemic dimensions of urban vulnerability remain underdeveloped, leaving a significant research gap.

This study addresses the gap by presenting intermediate results from Task 5.3.3 of the extended partnership “Return, *Multi-risk Science for Resilient Communities under a Changing Climate*”, focusing on systemic vulnerability. Attention to this issue arises within the context of a broader

programme on urban multi-risk, since the concept of systemic vulnerability allows us to understand how the interdependencies between physical, social, economic, ecological and technological subsystems can amplify the combined impact of different hazards. The literature also highlights the need to develop approaches that apply the SETS framework to the study of vulnerability (Khormorova *et al.*, 2025). A preliminary analysis shows that systemic vulnerability has been addressed mainly in Earth Sciences, Social Sciences, Engineering and Environmental Sciences, but it is still a relatively unexplored topic, as confirmed by the broader review of the concept of vulnerability in multi-risk contexts conducted by Limongi and Galderisi (2021). Although it is the least investigated approach to vulnerability, it has been applied to various natural

ti per la sua valutazione. La revisione è stata condotta consultando Scopus, Web of Science e Science Direct e applicando il metodo PRISMA per Scoping Review (Tricco *et al.*, 2018). L'obiettivo è stato quello di individuare metodi e strumenti utilizzati nella valutazione della vulnerabilità sistemica, con particolare attenzione alle relative dimensioni e scale di applicazione, soprattutto nei contesti urbani e metropolitani (Fig. 1).

Le pubblicazioni relative al periodo 2010–2025 sono state esaminate mediante ricerche testuali che associavano il termine «vulnerabilità sistemica» ai concetti di tipo di rischio, valutazione, modellizzazione e simulazione. Sono state effettuate quattro ricerche, selezionando esclusivamente articoli in lingua inglese e sottoposti a revisione paritaria, appartenenti a categorie specifiche. Dopo l'eliminazione dei duplicati e la selezione basata sugli abstract, sono stati inclusi 36 contributi (Tab. 1). Tali lavori sono stati analizzati in base al settore di ricerca, al metodo di valutazione, al modello adottato, alle dimensioni della vulnerabilità considerate (fisica, sociale, ecologica) e alla scala di applicazione (territoriale, urbana, di quartiere, edilizia). La maggior parte degli studi appartiene all'ambito delle Scienze della Terra e Planetarie (21%), seguite dalle Scienze Sociali e dall'Ingegneria (14% ciascuna) e dalle Scienze Ambientali (13%).

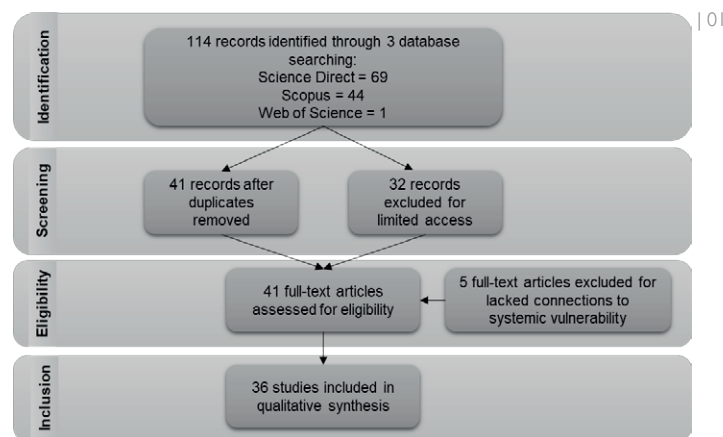
La ricerca mette in evidenza le relazioni tra vulnerabilità sistemica, modellizzazione e simulazione dei rischi geofisici e climatici, con particolare attenzione agli ambienti urbani multi-hazard. Per il rischio sismico, sono ampiamente impiegati GIS e metodi multi-criterio. Nei contesti costieri prevalgono gli approcci basati sull'analisi storica dei rischi, mentre gli studi sul rischio vulcanico enfatizzano la percezione, la comunicazione e l'integrazione di modelli complessi.

hazards, including earthquakes, floods and volcanic eruptions, and is now considered fundamental to better understanding the overall vulnerability of urban systems (Galderisi and Limongi 2021).

Specifically, we propose a multidimensional framework to operationalise systemic vulnerability in urban areas, supporting integrated, adaptive, and transformative design and planning strategies. Drawing on a literature review, we develop an indicator-based approach, identifying criteria that influence systemic vulnerability either positively or negatively.

The paper focuses on formulating the Climate Vulnerability Index (CVI) through a multi-criteria assessment, and on identifying constituent indicators, taking heat waves as the reference risk. The CVI is developed based on the dimensions and criteria of the conceptual framework, and is designed to assess urban vulnerability to heat waves.

The structure of the paper unfolds as follows. The methodology section delineates the PRISMA-based literature review alongside the analytical tools employed for systemic vulnerability assessment. Subsequently, the results section identifies and synthesises the key dimensions and criteria, which provide the foundation for an in-depth discussion of three core dimensions essential to the development of the Climate Vulnerability Index (CVI). The paper concludes by offering a forward-looking perspective on the prospective implementation of the index, and on its integration into GIS-based modeling within the selected case study.



Tra le metodologie più utilizzate si annoverano l'analisi spaziale basata su GIS, la *multi-criteria decision analysis* (MCDA), l'analisi delle reti delle interdipendenze sistemiche e le simulazioni basate su scenari. Le applicazioni specifiche riguardano frane, reti idriche e infrastrutture interdipendenti.

Elemento comune a tutti gli studi è l'attenzione ai fallimenti a cascata dei sistemi interconnessi (trasporti, acqua, energia). Sebbene alcuni lavori adottano prospettive olistiche, considerando fattori socio-economici e istituzionali, si riscontra una prevalenza di studi che si concentrano sulla perdita funzionale in settori specifici. Complessivamente, le metodologie variano in funzione del tipo di rischio, della scala spaziale e delle interconnessioni, evidenziando la necessità di approcci disegnati in maniera multi-fattoriale.

La letteratura conferma la complessità della vulnerabilità sistemica e la necessità di valutazioni multidisciplinari. Strumenti come GIS, MCDA, teoria delle reti e simulazioni forniscono framework utili, ma emerge la necessità di integrazione tra metodologie differenti.

Oltre all'analisi dei metodi di valutazione più comunemente utilizzati per il medesimo obiettivo di indagine della vulnerabilità sistemica, la letteratura esaminata ha evidenziato anche una prevalenza di criteri e indicatori impiegati a tale

Methodology

A preliminary analysis of the state of the art on systemic vulnerability of urban settlements indicates that existing frameworks vary considerably in scale, dimensions and tools, ranging from qualitative indices to modelling and simulation approaches. "Qualitative indices" refer to indicators derived from expert judgements, participatory assessments or subjective perceptions of the population, which are not based on directly measurable numerical data. These indices integrate aspects such as risk perception, trust in institutions, the effectiveness of social networks or the perceived quality of urban services, elements that are difficult to quantify but essential to understand and assess systemic vulnerability. Building on this, the present study revisits the scientific literature on systemic vulnerability with a specific focus on mod-

els and tools for its assessment. The review was conducted across Scopus, Web of Science and Science Direct using PRISMA for Scoping Reviews (Tricco *et al.*, 2018). The objective was to identify methods and tools applied in systemic vulnerability assessment, with particular attention to their dimensions and scales of application, especially within urban and metropolitan contexts (Fig. 1).

The keywords used in the searches were selected to identify contributions that address the issue of vulnerability from a systemic perspective. Publications relating to the period 2010–2025 were examined using nine text combinations based on the use of Boolean operators in order to broaden the scope of the search and include studies relevant to socio-ecological-technological systems (SETS). The main combinations used were:

Tab. 01 | Matrice di sintesi dei contributi ammissibili per la revisione (Fonte: elaborazione degli autori)
Synthesis matrix of the eligible contributions for the review (Source: created by the authors)

Reference	Subject area	Evaluation Method	Models	Hazard	Dimension	Scale
Albano, R., et al. (2013). https://doi.org/10.1007/978-3-642-31319-6_92	Engineering	Parameter-based scoring system	GIS-based Model	Geophysical	Physical -structural	City
Scaini, C., et al. (2014). https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.04.005	Engineering	Damage Matrix	GIS-based Model	Geophysical	Physical -structural	Territorial
Walker, B.B., et al. (2014). https://doi.org/10.1007/s11069-014-1240-2	Geography	AHP method	GIS-based Model	Geophysical	Physical -structural Socio - institutional -economic	Territorial
Porter, H., et al. (2025). https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.105113	Earth Science	Fault Tree Analysis	GIS-based Model	Geophysical	Physical -structural	Territorial
de Vries, J., et al. (2022) . https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W4-2022-29-2022	Urban Studies	Indicator-based approach	Tridimensional Model	Geophysical	Physical -structural	City
Lara-Valencia, F., et al. (2022). https://doi.org/10.3389/frwa.2022.782922	Urban Studies	Land Suitability Analysis Hydrological modelling	GIS-based model	Climatic	Physical -structural	Territorial
Albulescu, A.C. (2023). https://doi.org/10.3390/rs15051453	Urban Studies	Network Analysis Weighted Overlay Analysis	GIS-based model	Geophysical	Physical -structural	Territorial
Weir, A.M., et al. (2024). https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104997	Earth Science	Hazard-Agnostic Analysis Hazard-Dependent Analysis	-	Geophysical	Physical -structural	Territorial
Pitilakis, K., et al. (2016). https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.206	Earth Science	Performance Indicators	-	Natural	Physical -structural	Territorial
Wang, F., et al. (2019). https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.05.002	Engineering	Network Entropy model	-	Multiple	Physical -structural	City
Galderisi, A. and Limongi, G. (2021). https://doi.org/10.3390/su13169055	Urban Risk Planning	Multi-Hazard Assessment	Risk-Informed Planning Model	Multi-risk	Social-Institutional-Economic	Territorial
Moradi, M., et al. (2017). https://doi.org/10.1007/s11069-017-2822-6	Seismic Risk Assessment	GIS & Multi-Criteria Analysis	Choquet Integral Model	Earthquake	Physical-Structural	City
Pascale, S., et al. (2010). https://doi.org/10.5194/nhess-10-1575-2010	Geology	Landslide Risk Model	Systemic Vulnerability Model	Landslide	Physical-Structural	District
Modaressi, H., et al. (2014). https://doi.org/10.1007/978-94-017-8835-9_5	Engineering	Performance Indicators	Systemic Vulnerability Model (SYNER-G)	Earthquake	Physical-Structural	Territorial
Molarius, R., et al. (2015). https://doi.org/10.3970/cmes.2015.109.131	Engineering / Resilience Studies	Scenario-based Impact Assessment	Comprehensive Impact Assessment Model	Extreme Winter Event (Climatic)	Multi-dimensional (Systemic)	National / Regional
Beltramo, S., et al. (2022). https://doi.org/10.6093/1970-9870/9069	Urban Studies	Multi-Disciplinary Assessment	Territorial Vulnerability Framework	Multi-risk	Social-Institutional-Economic	City
Golla, A.P.S., et al. (2022). https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103406	Engineering	Structural Vulnerability Analysis	Built Environment Response Model	Earthquake	Physical-Structural	Building
Albulescu, A.C., et al. (2022). https://doi.org/10.1080/19475705.2022.2065219	Seismic Risk Assessment	Systemic Vulnerability Analysis	Urban Seismic Risk Model	Earthquake	Physical-Structural	City
Pasi, R., et al. (2018). https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2_6	Urban Resilience	Flood Risk Assessment	Spatial Planning Framework	Flood	Social-Institutional-Economic	Territorial
Hénaff, A., et al. (2018). https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.29000	Coastal Risk	Historical Hazard Analysis	Coastal Erosion & Submersion Model	Coastal	Ecological	Territorial
Gomez-Zapata, J.C., et al. (2021). https://doi.org/10.3390/su13041714	Volcanic Risk	Community Perception & Risk Communication	Volcanic Hazard Model	Volcanic	Social-Institutional-Economic	Territorial
Barclay, J. et al. (2022). https://doi.org/10.1111/disa.12537	Disaster Studies	Historical Disaster Mapping	Volcanic Response Model	Volcanic	Social-Institutional-Economic	Territorial
Stenfors, E., et al. (2024). https://doi.org/10.1002/wat2.1692	Socio-Hydrological Systems	Climate Vulnerability Assessment	Drought Risk Model	Climate	Ecological	Territorial

| Tab. 01

Tab. 01 | Matrice di sintesi dei contributi ammissibili per la revisione (Fonte: elaborazione degli autori)
Synthesis matrix of the eligible contributions for the review (Source: created by the authors)

Reference	Subject area	Evaluation Method	Models	Hazard	Dimension	Scale
Bonadonna, C., et al. (2021). https://doi.org/10.1186/s13617-021-00108-5	Applied Volcanology	Volcanic Risk Integration	ADVISE Model	Volcanic	Physical-Structural	Territorial
Dominguez, L., et al. (2021). https://doi.org/10.3389/feart.2021.645945	Disaster Forensics	Post-Event Impact Assessment	Disaster Forensic Model	Volcanic	Physical-Structural	Territorial
Albulescu, A.C., et al. (2020). https://doi.org/10.2495/RISK200021	Seismic Vulnerability	Multi-Criteria Assessment	School Seismic Risk Model	Earthquake	Physical-Structural	Building
Hellequin, A.P. et al. (2013). https://doi.org/10.1051/nss/2014002	Social Sciences	Risk Perception Analysis	Coastal Vulnerability Model	Coastal	Social-Institutional-Economic	District
Hürlimann, M. et al. (2024). https://doi.org/10.1007/978-3-031-57357-6_37	Engineering	Multi-Hazard Scenario Analysis	PARATUS Project Model	Multi-risk	Social-Institutional-Economic	Territorial
Sdao, F. et al. (2011). https://doi.org/10.4408/IJEGE.2011-01.S-07	Geology	Landslide & Flood Combined Risk	Urban Hazard Model	Multi-risk	Physical-Structural	District
Shughrue, C. and Seto, K.C. (2018). https://doi.org/10.1007/s10584-018-2293-0	Industrial Risk	Network Analysis	Urban-Industrial Risk Propagation Model	Multi-risk	Economic	Global
Greco, M. and Martino, G. (2016). https://doi.org/10.1007/s11069-016-2293-1	Flood Risk Management	Preliminary Risk Mapping	Coastal Vulnerability Model	Flood	Ecological	Territorial

scopo. Questi risultano principalmente quantitativi, in quanto si basano su dati facilmente reperibili da fonti statistiche ufficiali o da studi e monitoraggi specifici a livello locale. Tuttavia, tali indicatori risultano insufficienti a rappresentare la complessità della vulnerabilità sistemica, che concerne anche – e soprattutto – la percezione delle comunità che vivono in contesti multi-rischio e le strategie di mitigazione, gestione e prevenzione implementate dalle istituzioni. Il quadro di sintesi proposto dal presente studio dovrà pertanto essere ulteriormente sviluppato e approfondito attraverso l’integrazione di tali aspetti.

Nella sezione seguente vengono illustrate le principali dimensioni e i criteri selezionati per la costruzione del framework finalizzato allo sviluppo di un indice di vulnerabilità climatica. Alla luce dei risultati emersi dalla revisione della letteratura e dei tre domini fondamentali identificati, la costruzione di tale Indice di Vulnerabilità Climatica (CVI) è stata sviluppata adottando il metodo Mazziotta–Pareto (MPI), ampiamente riconosciuto per la sua capacità di sintetizzare insieme eterogenei di indicatori in modo non compensativo. Tale approccio risulta particolarmente coerente con la natura sistemica della vulnerabilità urbana, poiché permette di integrare dimensioni tra loro

1. “systemic vulnerability” AND (“assessment” OR “evaluation”);
2. “systemic vulnerability” AND (“assessment” OR “evaluation”) AND “climate”;
3. “systemic vulnerability” AND (“assessment” OR “evaluation”) AND “geophysical”;
4. “systemic vulnerability” AND “modelling”;
5. “systemic vulnerability” AND “modelling” AND (“assessment” OR “evaluation”);
6. “systemic vulnerability” AND “simulation” AND (“assessment” OR “evaluation”);
7. “systemic vulnerability” AND “simulation”;
8. “systemic vulnerability” AND “simulation” AND “geophysical”;
9. “systemic vulnerability” AND “simulation” AND “climate”.

Only English-language and peer-reviewed papers in specific categories were selected. After eliminating duplicates and screening abstracts, 36 contributions were selected (Tab. 1). They were analysed by research field, evaluation method, model, vulnerability dimensions (physical, social, ecological) and application scale (territorial, city, district, building). Most works belong to Earth and Planetary Sciences (21%), followed by Social Sciences, Engineering (14% each), and Environmental Science (13%). The review highlights links between systemic vulnerability, modelling and simulation of geophysical and climatic risks, focusing on multi-hazard urban environments. GIS and multi-criteria methods are widely used to study seismic risk. Historical hazard approaches prevail in coastal contexts, while vol-

canic risk studies emphasise perception, communication and integrated models. The most used methodologies include GIS-based spatial analysis, multi-criteria decision analysis, network analysis of systemic interdependencies, and scenario-based simulations. Specific applications concern landslides, water networks, and interdependent infrastructures. Common to all is the emphasis on cascading failures of interconnected systems (transport, water, energy). While some studies adopt holistic perspectives including socio-economic and institutional factors, others focus on functional loss in specific sectors. Overall, methodologies vary according to risk type, spatial scale and interconnections, highlighting the need for specific approaches for different contexts.

Urban systemic vulnerability, being an inherently multidimensional phenomenon, requires methods capable of simultaneously addressing qualitative and quantitative variables, weighting them according to their relative relevance. The use of tools such as GIS, Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), network theory and simulations allows heterogeneous indicators – social, environmental, economic and infrastructural – to be integrated within a single assessment framework. MCDA also makes the decision-making process transparent and the results replicable, supporting the definition of intervention priorities in multi-risk contexts. The literature confirms the complexity of systemic vulnerability and the need for multidisciplinary assessments. Tools such as GIS, MCDA, network theory and simulations provide valu-

differenti – sociali, ambientali, economiche e spaziali – evitando che condizioni molto favorevoli in un ambito compensino criticità rilevanti in un altro, come spesso accade nei contesti di rischio multilivello.

Il metodo MPI prevede una normalizzazione preliminare degli indicatori, utile a rendere confrontabili variabili diverse per scala e natura, incluse quelle qualitative trasformate in scale ordinali. La procedura consente di mantenere l'informazione relativa alla variabilità interna di ciascun indicatore, preservandone il contributo specifico alla vulnerabilità complessiva. Successivamente, attraverso il calcolo dell'indice di sintesi non compensativo, il metodo applica un meccanismo penalizzante basato sulla deviazione standard degli indicatori, riducendo il valore dell'indice finale quando si rilevano condizioni di squilibrio significativo tra le dimensioni considerate. Tale caratteristica si rivela particolarmente adeguata nel contesto della vulnerabilità sistemica, dove l'asimmetria tra le componenti del sistema urbano costituisce un elemento strutturale del rischio.

L'adozione del metodo Mazziotta-Pareto consente inoltre di integrare in modo coerente indicatori sia quantitativi sia qualitativi, superando una delle principali criticità evidenziate dalla letteratura e dallo stesso revisore. La possibilità di includere informazioni di natura socio-istituzionale e percezioni legate all'esposizione e alla sensibilità rende l'indice maggiormente aderente alla complessità dei sistemi urbani e delle loro interdipendenze. Il risultato è un indicatore globale stabile, replicabile e facilmente spazializzabile in ambiente GIS, funzionale alle finalità del progetto e alle esigenze della pianificazione adattiva.

able frameworks, but integration is required.

In addition to the analysis of the most commonly used assessment methods for the same goal of systemic vulnerability, the analysed literature also revealed a prevalence of criteria and indicators used for this purpose. These are predominantly quantitative as they refer to data that are readily available from official statistical sources or from specific studies and monitoring conducted at the local level. However, they are not sufficient to convey the complexity of systemic vulnerability, which lies in the fact that it also and above all concerns the perception of communities living in multi-disaster contexts and the mitigation, management and prevention strategies implemented by institutions. Therefore, this initial analysis and synthesis will have to be further developed and deepened

through the integration of these aspects. The following section shows the main dimensions and criteria selected to construct the framework for the development of a climate vulnerability index.

Considering the results emerging from the literature review and the three fundamental domains identified, the Climate Vulnerability Index (CVI) was developed using the Mazziotta-Pareto (MPI) method, widely recognised for its ability to synthesise heterogeneous sets of indicators in a non-compensatory manner. This approach is particularly consistent with the systemic nature of urban vulnerability, as it allows for the integration of different dimensions – social, environmental, economic and spatial – preventing very favourable conditions in one area from compensating for significant crit-

Risultati

Lo studio degli indici e degli indicatori di vulnerabilità ha ricevuto crescente attenzione negli ultimi anni, poiché rappresentano strumenti fondamentali per la valutazione della resilienza delle società di fronte a diversi rischi. Gli indicatori di vulnerabilità coprono molteplici dimensioni, comprendendo fattori demografici, economici, infrastrutturali e ambientali. Tra gli indicatori comunemente utilizzati figurano la densità di popolazione (Isidoro *et al.*, 2013; Nath *et al.*, 2015), la distribuzione per età – con particolare riferimento alle percentuali di anziani e bambini (Dong *et al.*, 2020; Alam and Haque, 2018), i tassi di occupazione (Moghadas *et al.*, 2020; Tran *et al.*, 2020), i livelli di reddito (Spaliviero *et al.*, 2018), la povertà energetica (D'Ambrosio and Di Martino, 2016), i livelli di alfabetizzazione (Vicente *et al.*, 2014; Alam and Haque, 2021) e l'accesso ai servizi sanitari (Dong *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2019). Questi indicatori, considerati nel loro insieme, offrono una panoramica della suscettibilità delle popolazioni a eventi avversi, inclusi disastri naturali, crisi economiche e impatti dei cambiamenti climatici. Diverse metodologie sono comunemente impiegate per la valutazione degli indici di vulnerabilità. Modelli statistici come l'Analisi delle Componenti Principali (PCA) e l'analisi fattoriale vengono ampiamente utilizzati per aggregare molteplici indicatori in indici composti (Cutter and Finch, 2008), riducendo la dimensionalità pur preservando i fattori più significativi. I Sistemi Informativi Geografici (GIS) rivestono un ruolo fondamentale nelle valutazioni spaziali della vulnerabilità, permettendo la visualizzazione e la mappatura delle aree a rischio (Moghadas *et al.*, 2019). Indici composti, quali il Social Vulnerability Index (SoVI), integrano molteplici indicatori per fornire

ical issues in another, as often happens in multi-level risk contexts.

The MPI method involves preliminary normalisation of the indicators, which is useful for making variables that differ in scale and nature comparable, including qualitative variables transformed into ordinal scales. The procedure allows information on the internal variability of each indicator to be retained, preserving its specific contribution to overall vulnerability. Subsequently, through the calculation of the non-compensatory summary index, the method applies a penalising mechanism based on the standard deviation of the indicators, reducing the value of the final index when significant imbalances are detected between the dimensions considered. This feature is particularly appropriate in the context of systemic vulnerability, where asymmetry between

components of the urban system is a structural element of risk.

The adoption of the Mazziotta-Pareto method also allows for the consistent integration of both quantitative and qualitative indicators, overcoming one of the main critical issues highlighted in the literature and by the reviewer himself. The possibility of including socio-institutional information and perceptions related to exposure and sensitivity makes the index more responsive to the complexity of urban systems and their interdependencies. The result is a stable, replicable global indicator that can be easily spatialised in a GIS environment that is functional to the project's objectives, and to the needs of adaptive planning.

Results

The study of vulnerability indices and indicators has gained significant at-

una valutazione complessiva della vulnerabilità su diverse scale geografiche (Ainuddin and Routray, 2012). Un altro approccio diffuso riguarda l'impiego di indici ponderati, nei quali i diversi indicatori ricevono pesi specifici basati sul giudizio di esperti o su dati empirici (Chen and Leandro, 2019), consentendo valutazioni su misura che riflettano le condizioni locali.

Metodi qualitativi, come i sondaggi Delphi e le consultazioni con stakeholder, integrano le tecniche quantitative mediante l'inclusione di opinioni esperte e prospettive comunitarie (Yoga Putra *et al.*, 2019). Data la natura complessa e multifattoriale della vulnerabilità, si osserva un crescente ricorso ad approcci ibridi che integrano metodi quantitativi e qualitativi, rafforzando la solidità e l'applicabilità delle valutazioni e favorendo interventi politici e allocazioni di risorse più efficaci. Con l'evolversi del settore, i progressi nell'analisi dei big data e nell'apprendimento automatico sono destinati a migliorare la precisione e le capacità predittive degli indici di vulnerabilità, potenziandone il ruolo nella riduzione del rischio di disastri e nella pianificazione per uno sviluppo sostenibile.

La revisione evidenzia inoltre la natura specifica per tipologia di rischio degli indicatori di vulnerabilità, che variano significativamente tra ondate di calore, alluvioni, erosione costiera e terremoti. Gli indicatori relativi alla popolazione – età, genere, status socioeconomico, composizione familiare – dominano costantemente le valutazioni di esposizione e sensibilità, confermandone il ruolo cruciale nell'analisi della vulnerabilità.

Dalla letteratura sono emersi tre ambiti fondamentali per comprendere la vulnerabilità urbana e il modo in cui può essere misurata attraverso gli indicatori (Fig. 2):

1. **Popolazione (dimensione sociale/demografica):** Include caratteristiche statistiche e demografiche come la densità della popolazione, la distribuzione per età, i tassi di povertà e lo stato occupazionale.
2. **Sistemi hard (dimensione fisica/ambiente costruito):** Comprende la robustezza delle infrastrutture, la qualità dell'edilizia, i sistemi tecnologici (ad es. climatizzazione) e le infrastrutture verdi e blu.
3. **Sistemi soft (istituzionali, economici e servizi):** Riguarda la governance, i sistemi sanitari, l'istruzione, la risposta alle emergenze, la sicurezza e la stabilità economica.

Mentre molti studi danno priorità all'esposizione fisica e alla vulnerabilità sociale (in particolare l'età e la povertà), le interdipendenze sistemiche – come i guasti a cascata nelle reti energetiche, di trasporto e di servizio – sono meno frequentemente esplorate. Le interazioni tra rischi multipli o composti sono raramente integrate, in quanto la maggior parte degli indicatori rimane specifica per il rischio senza tenere conto degli effetti a cascata o sinergici.

Questa frammentazione nell'operatività evidenzia la necessità critica di quadri che considerino la vulnerabilità come un sistema socio-ecologico-tecnologico, riconoscendo l'interconnessione di più dimensioni piuttosto che di fattori isolati.

Sulla base di questi risultati, la revisione della letteratura informa il disegno dell'Indice di Vulnerabilità strutturato in modo da integrare indicatori di popolazione, sistemi hard e soft. Il rischio derivante dalle ondate di calore è stato scelto come caso di studio preliminare a causa della sua crescente ricorrenza nell'ambito dei rischi urbani dovuti ai cambiamenti climatici. Il CVI è destinato alla modellazione spaziale basata su GIS per consen-

tention in recent years, as they serve as critical tools for assessing societal resilience to various hazards. Vulnerability indicators span multiple dimensions, including demographic, economic, infrastructural, and environmental factors. The literature review revealed that commonly used indicators include population density, age distribution – particularly proportions of elderly and children, employment rates, income levels, fuel poverty, literacy rates, and access to healthcare. These indicators collectively provide insight into the susceptibility of populations to adverse events, including natural disasters, economic crises, and climate change impacts. Several methodologies are commonly employed to evaluate vulnerability indices. Statistical models such as Principal Component Analysis (PCA) and factor analysis are widely used to aggregate

multiple indicators into composite indices (Cutter and Finch, 2008). These methods reduce dimensionality while retaining the most significant contributing factors. Geographic Information Systems (GIS) play a fundamental role in spatial vulnerability assessments, enabling visualisation and mapping of risk-prone areas (Moghadas *et al.*, 2019). Composite indices, such as the Social Vulnerability Index (SoVI), integrate multiple indicators to provide a comprehensive assessment of vulnerability at varying geographic scales (Ainuddin and Routray, 2012). Another prevalent approach involves the use of weighted indices, where different indicators are assigned specific weights based on expert judgment or empirical data (Chen and Leandro, 2019). Qualitative methods, such as Delphi surveys and stakeholder consultations, complement quantitative techniques

by incorporating expert opinions and community perspectives (Yoga Putra *et al.*, 2019). Given the complex and multifactorial nature of vulnerability, there is a growing use of hybrid approaches that integrate quantitative indicators (census data, environmental indices derived from GIS, building characteristics), and qualitative indicators obtained through the Delphi method or through interviews with local stakeholders. This combination allows for the integration of objective measurements of exposure and vulnerability with local knowledge of social processes, improving the predictive capacity of systemic vulnerability models, strengthening the robustness and applicability of assessments, and promoting more effective policy interventions and resource allocations. As the field evolves, advances in big data analytics and machine learning

are expected to refine the accuracy and predictive capabilities of vulnerability indices, thereby enhancing their role in disaster risk reduction and sustainable development planning.

The review further highlights the hazard-specific nature of vulnerability indicators, which vary markedly across heat waves, flooding, coastal erosion, and earthquakes. Population-related indicators – age, gender, poverty status, household composition – consistently dominate exposure and sensitivity assessments across hazards, confirming their critical role in vulnerability analysis.

Three core domains emerged from the literature as foundational in understanding urban vulnerability, and how it can be measured through indicators (Fig. 2):

1. **Population (Social/Demographic):** This includes statistical and de-

Hazard	Type of data	Vulnerability Indicators	
Heat wave	Statistical Data	Population density	Social
Heat Wave	Demographic Characteristics	Age; Gender; Ethnicity; Disadvantaged population; Fuel poverty; Household poverty; Employment; Household size	
Flooding	Demographic Characteristics	Population density; People exposure; Age; Gender; Disadvantaged population; Fuel poverty; Special needs; Employment	
Coastal erosion	Demographic Characteristics	Population density; Poverty headcount ratio; Dependency ratio; Disability; Employment; Literacy rate	
Earthquake	Demographic Characteristics	Population >60 years; Children <15 years; Female population; Illiteracy rate; Family size; Population density	Physical-Spatial
Heat wave	Heat stress	Discomfort	
	Built-up areas	Access to green spaces	
	Technological systems	Air-conditioning	
	Green & Blue Infrastructure	Green coverage	
Flooding	Built-up areas	Sturdy housing type; Housing age; Homeownership	
Coastal erosion	Built-up areas	Household density; Proximity to shoreline; Poor housing	Socio-Economic-Cultural
Heat wave	Health	GDP per capita; Access to medical facilities; Access to safe water; Health assistance; Health conditions; Mortality; Services; Insurance	
	Education	Educational level	
	Law enforcement	National basic livelihood guarantees	
	Emergency	Emergency response	
	Economy/Finance	Financial independence; Gross Regional Domestic Product (GRDP)	
Flooding	Health	Social insurance; Health access; Medical capacity; Income; Medical spending; Built-environment conditions; Renter households	
	Education	Educational attainment equality	
	Recreational	Public recreational facilities	
	Ecosystem	Harmony with nature	
	Mobility	Public transportation service	
	Law enforcement	Learning mechanism	
	Emergency	Redundancy of emergency services; Civic/social advocacy organizations; Duration of evacuation; Previous flood experience	
	Economy/Finance	Economic tolerance; Local economic level	
Earthquake	Health	Household income; Economically dependent families	

re valutazioni di vulnerabilità localizzate e attuabili, supportando i pianificatori urbani e i responsabili politici in sforzi mirati per la costruzione della resilienza.

Discussione

La revisione della letteratura ha evidenziato una notevole varietà di indicatori e framework di vulnerabilità, mettendo però in luce una diffusa frammentazione nell’approccio alla valutazione della vulnerabilità sistemica. La maggior parte degli studi

esistenti tende a isolare gli indicatori all’interno di confini disciplinari o settoriali ristretti, concentrandosi singolarmente sulle caratteristiche della popolazione, sulle infrastrutture fisiche o sui sistemi istituzionali ed economici. Questa prospettiva compartimentata limita la capacità di cogliere la natura complessa, dinamica e interconnessa della vulnerabilità urbana. La letteratura sottolinea tre domini fondamentali, comunemente indicati come popolazione (sociale/demografico), sistemi hard (fisico/infrastrutturale) e sistemi soft (istituzionale/economico/

mographic characteristics such as population density, age distribution, poverty rates, and employment status.

2. Hard Systems (Physical/Built Environment): This dimension covers infrastructure robustness, housing quality, technological systems (e.g., air conditioning), and green-blue infrastructure.

3. Soft Systems (Institutional, Economic, and Service-related): This encompasses governance, health systems, education, emergency response, law enforcement, and economic stability.

While many studies prioritise physical exposure and social vulnerability (notably age and poverty), systemic interdependencies—such as cascading failures in energy, transportation, and service networks—are less frequently explored. Multi-risk or com-

pound hazard interactions are rarely integrated, as most indicators remain hazard-specific without accounting for cascading or synergistic effects.

This fragmentation in operation-alisation highlights a critical need for frameworks that consider vulnerability a socio-ecological-technological system (SETS), recognising the interconnectedness of multiple dimensions rather than viewing them as isolated factors.

Building on these findings, the review informs the design of a Climate Vulnerability Index (CVI) structured to integrate population, as well as hard and soft system indicators. Heat stress was chosen as the initial case study due to its rising significance under climate change and urban heat island effects. The CVI is intended for GIS-based spatial modelling to enable localised, actionable vulnerability assessments,

supporting urban planners and policy-makers in targeted resilience-building efforts.

Discussion

The comprehensive literature review revealed a rich diversity of vulnerability indicators and frameworks, yet it also underscored a prevailing fragmentation in the approach to assessing systemic vulnerability. Most existing studies tend to isolate indicators within narrow disciplinary or sectoral boundaries—focusing on either population characteristics, physical infrastructure, or institutional and economic systems individually. This siloed perspective limits the ability to capture the complex, dynamic, and interconnected nature of vulnerability in urban environments, particularly in relation to climate-related hazards like heat stress. The literature emphasised

three core domains often referred to as population (social/demographic), hard systems (physical/infrastructural), and soft systems (institutional/economic/service-related) (Ainuddin and Routray, 2012; Cutter and Finch, 2008). Each domain influences vulnerability but, importantly, their interactions create systemic vulnerabilities that single-factor analyses fail to capture.

Building on such insights, the proposed Climate Vulnerability Index (CVI) framework integrates three interconnected dimensions (socio-environmental, socio-economic and socio-spatial), associated with measurable criteria and indicators, forming the basis for a multi-criteria assessment of systemic vulnerability (Fig. 3). This integration directly addresses the shortcomings identified in the literature by recognising that vulnerability

servizi) (Ainuddin and Routray, 2012; Cutter and Finch, 2008). Ciascun dominio influenza la vulnerabilità, ma è soprattutto l'interazione tra essi a generare vulnerabilità sistemiche che le analisi mono-fattoriali non riescono a catturare.

Sulla base di queste evidenze, l'indice proposto adotta un framework multidimensionale che integra criteri chiave in tre dimensioni interconnesse: socio-ambientale, socio-economica e socio-spaziale. Tale integrazione affronta direttamente le carenze identificate in letteratura, riconoscendo che la vulnerabilità emerge dall'interazione tra caratteristiche demografiche, elementi dell'ambiente costruito e condizioni socio-istituzionali ed economiche, dimensioni storicamente trattate separatamente. I fattori legati alla popolazione si confermano indicatori di vulnerabilità predominanti per diverse tipologie di rischio (Dong *et al.*, 2020; Alam and Haque, 2018), influenzando direttamente esposizione e sensibilità e modulando l'accesso alle risorse adattive. I sistemi hard comprendono le infrastrutture fisiche e le condizioni ambientali che determinano la capacità di attenuare o amplificare gli impatti dei pericoli (Moghadas *et al.*, 2019; Spaliviero *et al.*, 2018). I sistemi soft modellano i meccanismi di supporto istituzionale che favoriscono il recupero e la resilienza (Chen and Leandro, 2019; Yoga Putra *et al.*, 2019), ma risultano spesso sottorappresentati negli indici di vulnerabilità. Il framework del CVI integra tre dimensioni interconnesse (socio-ambientale, socio-economica e socio-spaziale) associandola a criteri e indicatori misurabili. Esso evidenzia come la vulnerabilità all'ondata di calore emerga dall'interazione tra fattori ambientali, socio-economici spaziali e demografici, fornendo la base per una valutazione multi-criterio della vulnerabilità sistemica (Fig. 3).

emerges from the interplay among demographic characteristics, built environment features, and socio-institutional and socio-economic conditions – dimensions that have historically been treated separately. Population factors consistently emerged as dominant vulnerability indicators across hazards (Dong *et al.*, 2020; Alam and Haque, 2018), directly influencing exposure and sensitivity, and also mediating access to adaptive resources. Hard systems encompass physical infrastructure and environmental conditions that affect the capacity to either buffer or amplify hazard impacts (Moghadas *et al.*, 2019; Spaliviero *et al.*, 2018). Soft systems shape the institutional support mechanisms that enable recovery and resilience (Chen and Leandro, 2019; Yoga Putra *et al.*, 2019) but have often been underrepresented in vulnerability indices.

The criteria are articulated as follows:

- Socio-environmental dimension: this dimension reflects both hard system factors that determine the vulnerability of the physical environment and the characterisation of urban microclimates, as well as distributional-spatial, demographic and accessibility aspects. The criteria considered include the presence of green spaces, population density and the level of discomfort in open spaces. Urban microclimate modelling shows that limited vegetation reduces evaporative cooling and shading, while high housing densities are often associated with a lack of green spaces and extensive impervious surfaces, intensifying the urban heat island effect. The lack of shaded and permeable open spaces increases discomfort and reduces opportunities for outdoor cooling.

I criteri sono articolati come segue:

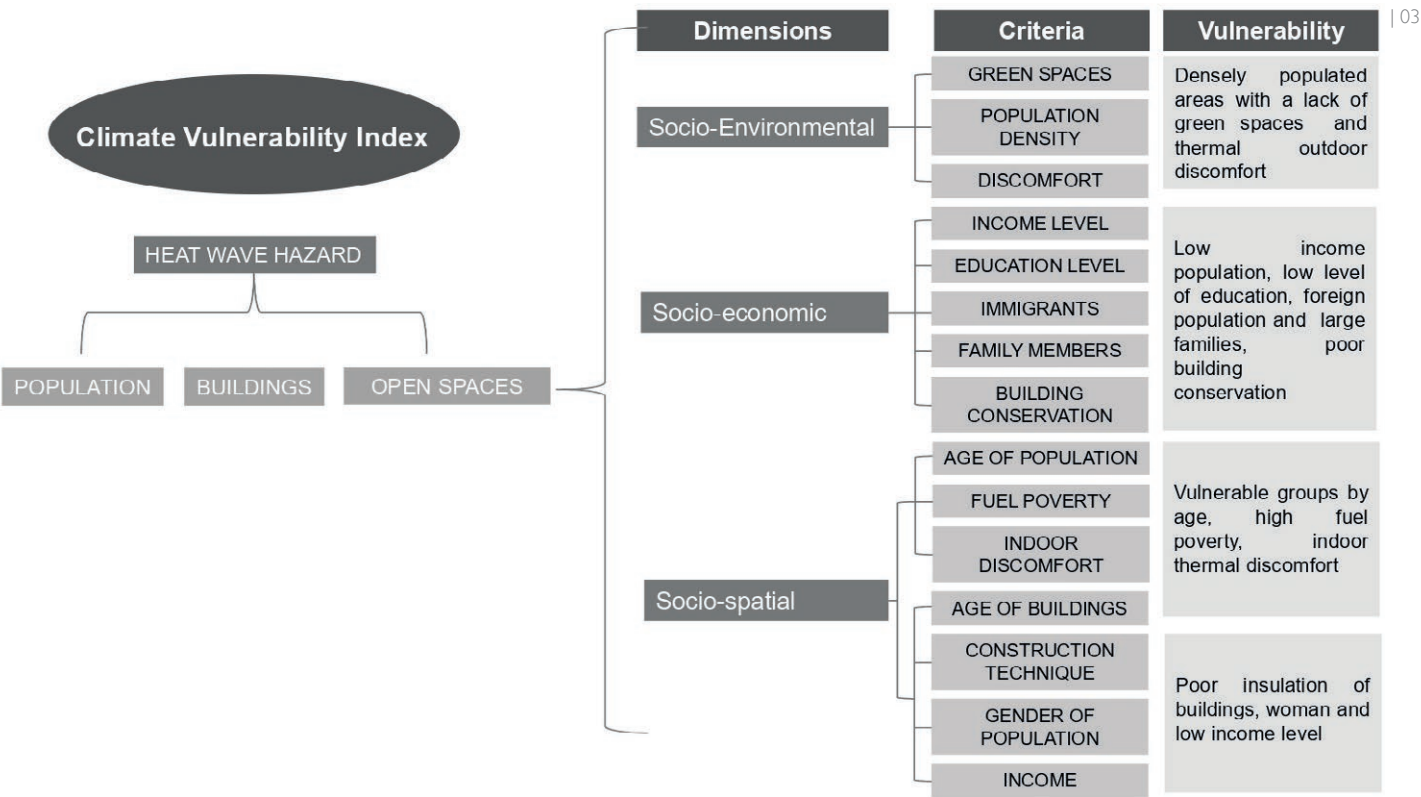
- Dimensione socio-ambientale: questa dimensione riflette i fattori dei sistemi hard che determinano l'esposizione attraverso l'ambiente fisico e i microclimi urbani. I criteri considerati includono spazi verdi, densità di popolazione e discomfort negli spazi aperti. Una vegetazione limitata riduce il raffrescamento evaporativo e l'ombreggiatura, mentre densità più elevate sono spesso associate a scarsa presenza di aree verdi e a superfici impermeabili estese, intensificando l'effetto isola di calore urbana. La carenza di spazi aperti ombreggiati amplifica il discomfort e riduce le opportunità di raffrescamento all'aperto. Queste interrelazioni evidenziano come la vulnerabilità non sia funzione esclusiva dell'esposizione, ma dipenda anche dalle disuguaglianze spaziali nell'accesso ai servizi ambientali.
- Dimensione socio-economica: questa dimensione coglie le caratteristiche dei sistemi soft che influenzano la capacità adattativa e la resilienza. I criteri includono reddito, istruzione, status migratorio, dimensione familiare e stato di conservazione degli edifici. Le famiglie a basso reddito spesso abitano in edifici con scarso isolamento termico e privi di climatizzazione, mentre livelli di istruzione limitati possono ridurre la consapevolezza dei rischi da calore e delle strategie di mitigazione. I migranti, in particolare coloro con reti sociali limitate, possono incontrare ulteriori ostacoli nell'accesso alle risorse. Le famiglie numerose affrontano stress dovuto al sovraffollamento, e la scarsa manutenzione degli edifici che aumenta ulteriormente il calore interno. Questi elementi dimostrano come la vulnerabilità

In addition, the assessment of environmental criteria considers spatial inequalities in access to ecosystem services necessary for comfort during heat waves, according to a distributional approach that assesses the availability and quality of open spaces in relation to housing density.

- Socio-economic dimension: this dimension captures soft system characteristics affecting adaptive capacity and resilience. Criteria include Income, Education, Immigrant Status, Family Size, and Building Conservation. Low-income households often occupy poorly insulated dwellings without access to air conditioning, while limited education can constrain awareness of heat risk and mitigation strategies. Immigrants, particularly those with restricted social networks, may face

additional barriers to accessing resources. Large families experience compounded stress due to overcrowding, and inadequate building maintenance further elevates indoor heat retention. These elements demonstrate how social vulnerability interacts with infrastructural limitations, reducing the capacity to cope during heat events.

- Socio-spatial dimension: this dimension integrates the demographic distribution of the most vulnerable population groups and housing conditions, combining population characteristics with attributes of the built environment that influence vulnerability to heat waves. Criteria include Age, Gender, Fuel Poverty, Indoor Discomfort, Age of Buildings, Construction Technique, and Income. Elderly individuals and children are physi-



- sociale interagisca con le limitazioni infrastrutturali, riducendo la capacità di affrontare eventi di calore intenso.
- Dimensione socio-spaziale: questa dimensione integra la vulnerabilità demografica e le condizioni abitative, combinando caratteristiche della popolazione con attributi dell'ambiente costruito che influenzano l'esposizione al calore. I criteri includono età, genere, povertà energetica, discomfort indoor, età degli edifici, tecnica costruttiva e

reddito. Anziani e bambini risultano fisiologicamente più sensibili al calore estremo, mentre le famiglie in condizione di povertà energetica incontrano difficoltà nell'accesso ai sistemi di raffrescamento. Gli edifici più datati, spesso realizzati con materiali termicamente inefficienti, trattengono il calore non dissipandolo durante la notte e generando isole di calore interne persistenti. Le dinamiche di genere possono inoltre influenzare i modelli di esposizione, poi-

ologically more sensitive to extreme heat, while fuel-poor households struggle to afford cooling systems. Older buildings, often constructed with thermally inefficient materials, trap heat and fail to dissipate it at night, creating persistent indoor heat islands. Gender dynamics may influence exposure patterns, as some populations spend more time indoors. The combination of these factors illustrates how systemic vulnerability is determined by the interaction between the sensitivity of demographic groups, and the energy and technological inefficiency of buildings.

Conclusion

The multidimensional framework proposed in this study advances the operationalisation of systemic vulnerability by shifting from siloed approaches to a

relational model that integrates socio-environmental, socio-economic, and socio-spatial dimensions. This structure captures real-world interdependencies – for example, the way in which high population density, low income and outdated housing interact to amplify risk – through criteria translated into measurable indicators, which constitute the proposed Climate Vulnerability Index (CVI). By linking criteria to indicators, the CVI enables evidence-based, comprehensive, and comparable assessments of vulnerability, overcoming fragmented analyses and providing a robust tool for urban planning, climate adaptation, and risk reduction. Its systemic perspective highlights how vulnerability emerges from the interplay of environmental exposure, social inequalities, and spatial conditions, as illustrated in the case of heat stress.

This indicator-based approach not only supports quantification, monitoring, and spatialisation of vulnerability but also facilitates policy uptake by guiding resource allocation toward populations and areas where overlapping vulnerabilities intensify risk. Future work will validate the framework through a pilot case study in Naples, applying Census and environmental data in GIS-based mapping to spatialise vulnerability at neighbourhood scale. A subsequent phase of validation of the framework is planned, involving a panel of experts from the fields of urban planning, climatology, emergency management and social policy. This phase will include review of the criteria; weighting using the 'Simos Cards method'; definition of the most appropriate aggregation technique (weighted sum or normalisation with PCA).

This application will demonstrate the feasibility of embedding systemic vulnerability into local adaptation planning and climate resilience strategies.

ché alcune popolazioni trascorrono più tempo in ambienti chiusi. Questi fattori sovrapposti illustrano come la vulnerabilità sistemica sia influenzata da fragilità demografica e inefficienza energetica e tecnologica degli edifici.

Conclusioni

Il *framework* multidimensionale proposto in questo studio rappresenta un avanzamento nell'operazionalizzazione della vulnerabilità sistemica, spostandosi da approcci compartimentati a un modello relazionale che integra le dimensioni socio-ambientale, socio-economica e socio-spaziale. Questa struttura consente di cogliere le interdipendenze reali – ad esempio il modo in cui elevata densità abitativa, basso reddito e abitazioni datate interagiscono per amplificare il rischio – attraverso criteri tradotti in indicatori misurabili, che costituiscono l'indice proposto.

Collegando i criteri agli indicatori, il CVI consente valutazioni della vulnerabilità basate su evidenze, complete e comparabili, superando le analisi frammentarie e fornendo uno strumento solido per la pianificazione urbana, l'adattamento climatico e la riduzione del rischio. La sua prospettiva sistemica evidenzia come la vulnerabilità emerga dall'interazione tra esposizione ambientale, disuguaglianze sociali e condizioni spaziali, come illustrato nel caso dello stress da calore.

Questo approccio basato su indicatori non solo supporta la quantificazione, il monitoraggio e la mappatura spaziale della vulnerabilità, ma facilita anche l'adozione di politiche, guidando l'allocazione delle risorse verso popolazioni e aree in cui le vulnerabilità sovrapposte intensificano il rischio. Lo sviluppo futuro dello studio prevede la validazione del *framework* mediante un caso pilota relativo alla città di Napoli, integrando dati censuari e ambientali in mappature GIS con la finalità di spazializzare la vulnerabilità a scala urbana di quartiere. Tale applicazione contribuirà a testare una metodologia per il supporto alle decisioni che includa la vulnerabilità sistemica nella pianificazione locale dell'adattamento climatico e nelle strategie di resilienza urbana.

REFERENCES

- Adger, W.N. (2006), "Vulnerability", *Global Environmental Change*, Vol. 16, No. 3, pp. 268-281. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Birkmann, J. (2006), "Indicators and criteria for measuring vulnerability: theoretical bases and requirements", in Birkmann, J. (Ed.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*, United Nations University Press, Tokyo, pp. 55-77.
- Birkmann, J., Cardona, O.D., Carreño, M.L., Barbat, A.H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Welle, T. and others (2013), "Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework", *Natural Hazards*, Vol. 67, No. 2, pp. 193-211.
- Birkmann, J., Cutter, S.L., Rothman, D.S., Welle, T., Garschagen, M., Van Ruijven, B., O'Neill, B. and Pulwarty, R. (2015), "Scenarios for vulnerability: opportunities and constraints in the context of climate change and disaster risk", *Climatic Change*, Vol. 133, pp. 53-68.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner, B. (2014), *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*, Routledge, London.
- Cutter, S.L. (2016), "Resilience to what? Resilience for whom?", *The Geographical Journal*, Vol. 182, No. 2, pp. 110-113.
- Cutter, S.L. (2021), "The changing nature of hazard and disaster risk in the Anthropocene", *Annals of the American Association of Geographers*, Vol. 111, No. 3, pp. 819-827.
- D'Ambrosio, V. and Di Martino, F. (2016), "The METROPOLIS research: experimental models and decision-making processes for the adaptive environmental design in climate change", *UPLanD – Journal of Urban Planning, Landscape & Environmental Design*, Vol. 1, No. 1, pp. 187-217. Available at: <https://doi.org/10.6092/2531-9906/5038>
- Füssel, H.M. (2010), "How inequitable is the global distribution of responsibility, capability, and vulnerability to climate change: a comprehensive indicator-based assessment", *Global Environmental Change*, Vol. 20, No. 4, pp. 597-611.
- Galderisi, A. and Limongi, G. (2021), "A comprehensive assessment of exposure and vulnerabilities in multi-hazard urban environments: a key tool for risk-informed planning strategies", *Sustainability*, Vol. 13, No. 16, 9055.
- Gencer, E., Folorunsho, R., Linkin, M., Wang, X., Natenzon, C.E., Wajih, S., Mani, N., Esquivel, M., Ali Ibrahim, S., Tsuneki, H., Castro, R., Leone, M., Panjwani, D., Romero-Lankao, P. and Solecki, W. (2018), "Disasters and risk in cities", in Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S. and Ali Ibrahim, S. (Eds), *Climate Change and Cities: Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, Cambridge University Press, New York, pp. 61-98.
- Gill, J.C. and Malamud, B.D. (2014), "Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards", *Reviews of Geophysics*, Vol. 52, No. 4, pp. 680-722. Available at: <https://doi.org/10.1002/2013RG000445>
- Gunaratne, M.S., Firdaus, R.R. and Sosai, A. (2023), "The importance of multidimensional vulnerability analysis in sustainable development", *Journal of Sustainability Science and Management*, Vol. 18, No. 9, pp. 38-57.
- Limongi, G. and Galderisi, A. (2021), "Twenty years of European and international research on vulnerability: a multi-faceted concept for better dealing with evolving risk landscapes", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 63, 102451.
- Mohammadi, S., De Angeli, S., Boni, G., Pirlone, F. and Cattari, S. (2024), "Current approaches and critical issues in multi-risk recovery planning of urban areas exposed to natural hazards", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 24, No. 1, pp. 79-107.
- Revi, A., Satterthwaite, D., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R.B., Pelling, M. and Sverdlík, A. (2014), "Towards transformative adaptation in cities: the IPCC's Fifth Assessment", *Environment and Urbanization*, Vol. 26, No. 1, pp. 11-28.
- Romero-Lankao, P. and Dodman, D. (2011), "Cities in transition: transforming urban centers from hotbeds of GHG emissions and vulnerability to seedbeds of sustainability and resilience", *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 3, No. 3, pp. 113-120.

Romero-Lankao, P., Hughes, S., Qin, H., Hardoy, J., Rosas-Huerta, A., Borquez, R. and Lampis, A. (2014), "Scale, urban risk and adaptation capacity in neighborhoods of Latin American cities", *Habitat International*, Vol. 42, pp. 224-235.

Schneiderbauer, S., Ehrlich, D. and Birkmann, J. (2006), "Social levels and hazard (in) dependence in determining vulnerability", in Birkmann, J. (Ed.), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*, United Nations University Press, Tokyo, pp. 78-102.

Sharifi, A. (2023), "The resilience of urban social-ecological-technological systems (SETS): a review", *Sustainable Cities and Society*, article 104910.

Tricco, A.C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K.K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M.D.J., Horsley, T., Weeks, L., Hempel, S. and others (2018), "PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): checklist and explanation", *Annals of Internal Medicine*, Vol. 169, No. 7, pp. 467-473. Available at: <https://doi.org/10.7326/M18-0850>