

AN APPROACH TO ASSESS URBAN RESILIENCE TO FLOOD RISK THROUGH SPATIAL ANALYSIS

Spatial features of settlements at risk to be flooded can contribute to detail several aspects of urban resilience. Based on this consideration, this contribution presents the results of a doctoral research aimed at analyzing urban resilience to floods assuming a spatial analysis approach. Based on the relevant literature, the research aimed at developing a conceptual spatial-based definition of urban resilience to flood, as a basic step toward a quantitative resilience assessment methodology. Importance of developing urban systems able to cope with natural calamities is fundamental within urban planning processes. Human activities and settlements have been located over time in a way to take advantage of available natural resources. As a result, the link between urban areas and natural environment results a key-element of the urbanization process.

Urban rivers reflect the outlined circumstance: water resources have been an attractor for urban development of nearby located areas. While appropriate use and protection of water bodies contribute to suitably preserving water resources, flood risk reduction strategies contribute to reduce the total risk of flooding. Urban areas crossed by rivers are inevitably at risk to be flooded and vulnerability of exposed elements (e.g. people, activities, buildings and infrastructures) determines different impacts. Mitigation of flood impacts can be achieved linking flood risk prevention and reduction to event preparedness, emergency recovery and adaptability to flood-induced effects: considering all event phases, the resulting flood risk management process globally improves urban resilience to floods. Structuring a resilient urban system implicitly requires to individuate suitable resilience's measurement and assessment methodologies. The latter, in turn, need a precisely outlined definition of the concept of resilience itself. The relevant literature offers several different meanings and characteristics of resilience, on varying on the adopted analysis perspectives. This circumstance is mainly related to the various fields of analysis to which the said concept can be applied. Moreover, no standard resilience definitions nor metrics are available: resilience property is often evaluated assuming some variables of urban systems as resilience's proxies, through a set of indicators specifically defined based on each study purpose, or considering qualitative resilience evaluations. Social aspects, economy, mental and social well-being, infrastructural features are some of the elements usually taken into account to assess how a urban system is able to resiliently face a perturbation or a crisis as a flood event. In fact, floods can give arise to a wide range of different

effects, as it can be deduced considering both the different impacted components of the affected urban system (e.g. people, assets, social structures, economy...) and the temporal scale of the said effects (e.g. long-term or short-term effects). All the described effects influence resilience degree in various ways. Urban resilience can be further characterized investigating urban space and its physical and functional roles. From a spatial analysis perspective, flooded areas modify the pattern of spatial accessibility within the entire affected settlement. Given the inability to reach flooded zones after a river flooding, non-flooded zones could become spatially isolated or marginalized, while some other locations (which result still reachable during or after the event) may assume a relevant role in reference to human movement. Appropriately examining urban space and its close connections with urban phenomena allows to further characterize flood-induced effects and consequences, as well as resilience ability to cope with floods. In fact, urban space is usually considered as a set of open empty areas resulting from a pattern of urban infrastructures and buildings. However, main principles and applications of the configurational approach of Space Syntax show that open spaces play a structured role, being the spatial layout able to shape and affect space perception and use [1] [2]. Intrinsically influencing how people move and interact, space results the linking element between physical and social aspects of the urban environment [3]. The syntactic theory assumes the spatial layout of open spaces in terms of the relative "*spatial configuration*", which syntactically corresponds to all spatial connections between spaces [3]. The definition of spatial configuration constitutes the basic concept to explore urban space through a people-oriented approach: based on the spatial layout of open spaces, spatial configuration can influence human perception of space affecting movement flow rates; spaces with high movement flows attract human activities; the latter, in turn, generate additional movement flows [2]. Based on these connections between configuration, movement and attractors, location of urban activities and spatial distribution of urban functionalities can be investigated starting from settlements' layout. Therefore, the syntactic approach of Space Syntax permits to examine and understand how the spatial organization is related to the use of urban space.

The configurational meaning of urban spaces deals with the influence of spatial patterns on human dynamics. This consideration indicates that changes of the spatial pattern can affect urban

behaviour. Therefore, flooded areas (or rather, non-accessible zones) do not just determine a lack of spatially reachable locations, but they can also affect human-related phenomena. Therefore, a spatial perspective of analysis can contribute to investigate the concept of urban resilience to flood risk. After recognizing the importance of introducing and developing resilience in reference to settlements located next to watercourses, the syntactic approach permits to understand whether and how spatial structures, as well as properties of urban spaces, can influence the resilience ability to face and withstand flood events. Operative techniques of Space Syntax analyze configurational properties through a set of topological centrality measures, which constitute quantitative "*configurational indexes*" [2]. The statistical correlation between indexes and movement flows [2] allows to consider the said indexes to investigate urban phenomena. This operative aspect represents a significant element in the challenging task of developing a spatial-based resilience assessment based on quantitative evaluations able to take into account human perception of spaces.

Approaches developed so far linking configurational characteristics to resilience of spatial systems [4] [5] [6] [7] examine different configurations, and relative spatial perturbations, to assess the entity of induced changes based on Space Syntax indexes values, or suitably combining the said indexes to define specific resilience indicators. No one of these literature approaches is specifically referred to spatial effects induced by floods. Moreover, comparisons between configurations developed so far are not applicable to examine resilience to flood events [8][9]: pre and post-flood configurations correspond to different systems (differences regard the topological structure, the system dimension and spatial organization), the latter requiring appropriate methods to be compared each other. Therefore, it follows the necessity to develop an appropriate methodology to examine relationships between spatial structures and resilience, specifically referring to the case of urban floods. The wide range of available definitions of resilience highlights that a specific description of resilience to flood is necessary as a basic step, aiming at developing a resilience assessment methodology. In order to point out an appropriate conceptual definition of resilience to flood, some river-city's characteristics can be identified as main components of resilience. Indeed, in case river features do not allow to convey a certain high water discharge, the river system's resistance is exceeded, determining a consequent water

overflow. The latter, accordingly to the vulnerability of exposed and affected areas, will induce some changes within the impacted urban system. Consequently, a certain adaptability of the affected urban system will be needed to reach a post-event status. Further actions and measures on the spatial pattern will also contribute to obtain a different urban status that, in future, will -in turn- face other possible high river discharges. This description permits to outline resilience property as a cyclic process, corresponding to a urban property that can be developed *before* event occurrence and it can be then applied *during* or *after* the flood emergency.

Based on this proposed conceptual definition, a methodology can be developed to investigate urban resilience through different stages of analysis:

- Assuming a river-city as a urban settlement located next to river(s), the analysis of relative urban syntactic features firstly provides an overview of system's configurational properties. This analysis stage gives a background knowledge to characterise a settlement potentially exposed to flood risk. Selection of all open spaces allows to obtain a pre-event spatial model; the latter can be analysed applying Space Syntax techniques to evaluate configurational indexes. Highest values of configurational indexes and relative spatial distribution provide a pattern of urban centralities (the so-called "*syntactic cores*") [1]. Syntactic centralities, as well as their relative location in reference to watercourses, significantly contribute to understand the role that urban rivers have been playing over time in regard of urban development and spatial functionalities.
- The analysis of the river-city system vulnerability can be obtained focusing on elements located within flood-prone areas and, therefore, exposed to flood risk. Computer-based analysis and hydraulic models allow to define areas potentially at risk to be flooded on varying of flood magnitude (or rather, water discharge/depth and event return period). A detailed description of elements at risk permits to assess the global level of urban vulnerability and, consecutively, typology and severity of probable flood-induced impacts. Syntactic centralities located within areas at risk clearly constitute an important element of vulnerability. However, the exam of elements at risk can be further detailed according to:
 - i) urban configuration: frequency distribution of syntactic measures allows to evaluate the percentage of spaces at risk owning the (10% or 30%) highest indexes values. This measure constitutes an indicator of the system susceptibility to be affected in its main configurational parts.
 - ii) urban morphology: syntactic cores at risk can be characterized also according to the land use pattern: significant percentages of cores at risk located in highly urbanized areas stand for an highly vulnerable system, with potentially considerable impacts on the whole configurational pattern.

iii) characteristics of the urban network and population distribution: the total percentage of all cores at risk represents a synthetic measure of meaningful vulnerability elements of the spatial topological network. According to Space Syntax common techniques, the latter is defined as a set of linear segments representative of visual connections between urban spaces [2] [10]. Linking this network-based vulnerability measure to the exposed population (the latter obtained as the percentage value of inhabitants within areas at risk), a well-defined overview of elements at risk is obtained.

- Analysis of non-flooded areas informs about spatial features during the flood event, while some parts of the settlement are flooded. Corresponding to the flood emergency, this analysis stage can be considered as part of a post-event analysis. Modeling a flood event permits to define floodplains; on the other side, resulting non-flooded areas provide a post-event spatial model. The layout of this new spatial pattern (or rather, this new post-event spatial configuration), the evaluation of relative Space Syntax measures and spatial location of cores provide the post-event centralities pattern. Acting as a physical perturbation within the whole river-city system, flooded areas induce changes in values and location of syntactic indexes. The distribution of post-event configurational indexes shows the new roles urban space assume after the event. Modeling a post-event scenario and examining its relative configurational features allows to examine the urban system in its modified pattern, understanding how spatial functionalities and perception globally change due to the event.
 - Magnitude of flood-induced effects can be described assessing how post-event configurational characteristics differ from the original pre-event urban status. Therefore, a suitable comparison between urban configurations correspondent to conditions before and after a certain flood event is needed. These two pre and post event spatial models can considerably differ each other (e.g.: flooded areas can determine a lack of open spaces or, depending on flood-prone extent and their location within the urban system, they can divide the spatial layout in smaller and isolated sub-areas). Normalized syntactic indexes introduced by Hillier [11] can be useful to achieve a meaningful comparison between the said configurations: frequency distribution of each normalized index can be evaluated, both referring to before and after the event conditions. Similarities and differences between the correspondent frequency distribution curves provide an overview of how the event modifies the spatial characteristics of the affected system.
- In order to obtain a global comparison between spatial models based on several indexes (the latter being simultaneously examined), a statistical-based procedure can be defined applying the Principal Component Analysis

"P.C.A." [12] and, subsequently, the Hierarchical Cluster Analysis "H.A.C." [13]. In more details, P.C.A. allows to process a large number of numerical and statistically correlated variables (i.e. a set of configurational indexes) to point out a lower number of uncorrelated new variables ("*principal components*") able to suitably represent a large variance amount of the original set of variables. Clustering algorithm of H.C.A. allows to individuate groups of elements (i.e. urban spaces) sharing similar values of examined variables (i.e. clusters sharing similar values of the principal components, or rather groups of spaces having in common configurational properties each component accounts for). An analytical processing phase is then obtained implementing P.C.A. and H.C.A., with the advantage of being able to examine syntactic properties based on a set of configurational measures, independently of the layout and the dimension of the compared spatial structures. As a result, syntactic measures are properly summarized, individuating classes of spaces with specific common syntactic properties. Spatially identifying the obtained clusters, the description of flood-induced changes and impacts on spatial features is facilitated.

Each one of the described stages of analysis provides numerical and non-dimensional indicators. Therefore, the entire methodology can be suitably applied to different urban structures, independently of the specific study area extent, relative river location and spatial organization. The methodology is basically structured following a scenario analysis approach: different conditions can be analyzed and relative resilience degree can be evaluated. More specifically, the described resilience assessment can be applied to distinct river-cities, to examine relative spatial features and potential ability to withstand flooding. Correspondent results can be suitably compared in reference to relative variations of urban resilience to floods. Moreover, considering different return periods, distinct flood events can be modeled. In this case, each flood event corresponds to a given resilience level and the methodology can be implemented to understand how and to what extent severity of flooding affects the vulnerability of the spatial structure and the post-event urban reaction. The main assumption based on which urban structures are related to urban resilience is that spatial properties can affect urban phenomena and flood impacts on spatial layout, in turn, can influence the way the urban system copes with mayor flood events. This consideration means that each variation or perturbation of a given spatial layout could affect resilience to floods. Therefore, urban development measures or structural actions able to change the spatial layout of river-cities can be examined in reference to how the said actions have effects on resilience property from a spatial perspective: given a certain settlement, different actions determine various spatial layouts. The latter can be analyzed through the developed

methodology to understand their effect on city reaction to flood. This application, along with the previous ones, makes the developed methodological approach a decision-supporting tool leading to resilience-oriented strategies. Enabling the assessment of potential impacts of urban measures, the approach allows also to achieve an ex-ante evaluation of consequences of interventions on the urban system.

Constituting sensitive urban environments, river-cities require appropriate planning decisions in order to combine natural, environmental and human-related aspects. Developing appropriate resilience assessment methodologies contributes to consider urban resilience to natural hazards as an integral part of urban planning processes.

Resilience-oriented approaches represent a significant step to achieve a sustainable urban development, as well as a globally improved risk management.

REFERENCES

- [1] B. Hillier, J. Hanson, *The social logic of space*, 1984. Cambridge: Press syndicate of the University of Cambridge, 1984.
- [2] B. Hillier, A. Penn, J. Hanson, T. Grajewski, J. Xu, "Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement," in *Environment and Planning B: planning and design* 20.1 (1993): 29-66, 1993.
- [3] B. Hillier, L. Vaughan, "The city as one thing," in *Progress in Planning* 67.3 (2007): 205-230, 2007.
- [4] A. Carpenter, "A safe haven from the storm? Disaster recovery and space," School of City and Regional Planning, Georgia Institute of Technology, 2012.
- [5] V. Cutini, "The city when it trembles. Earthquake destructions, post-earthquake reconstruction and grid configuration," Proceedings of the 9th International Space Syntax, Seoul: Sejong University (2013): 102, 2013.
- [6] J. Gil, P. Steinbach, "From flood risk to indirect flood impact: evaluation of street network performance for effective management, response and repair," First International Conference on Flood Recovery, Innovation and Response, 2008.
- [7] D. Koch, P. Miranda Carranza, "Syntactic resilience," 9th International Space Syntax Symposium, Seoul Sejong University 2013. Sejong University Press, 2013.
- [8] A. Esposito, V. Di Pinto, "Calm after the storm. The configurational approach to manage flood risk in river-cities," Proceedings of the 10th International Space Syntax Symposium. London. (2015): 70, 2015.
- [9] A. Esposito, "Assessing impacts of flood events in urban areas to understand the resilience of the urban system," Doctoral Thesis, 2016.
- [10] A. Turner, "Angular analysis." Proceedings of the 3rd International Symposium on Space Syntax, 2001.
- [11] W. R. G. Hillier, Y. Tao, A. Turner, "Normalising least angle choice in Depthmap-and how it opens up new perspectives on the global and local analysis of city space," in *Journal of Space syntax* 3.2 (2012): 155-193, 2012.
- [12] H. Hotelling, "Analysis of a complex of statistical variables into principal components," in *Journal of educational psychology* 24.6 (1933): 417, 1933.
- [13] R. C. Tryon, *Cluster analysis: correlation profile and orthometric (factor) analysis for the isolation of unities in mind and personality*. Edwards brother, Incorporated, lithoprinters and publishers, 1939.

VALUTAZIONE DELLA RESILIENZA URBANA RISPETTO AD EVENTI ALLUVIONALI E ANALISI SPAZIALE

Lo studio delle caratteristiche spaziali degli insediamenti esposti al rischio di eventi alluvionali può contribuire ad analizzare la resilienza urbana rispetto agli eventi detti. Sulla base di tale considerazione, questo contributo presenta i risultati di un lavoro di tesi di dottorato volto ad esaminare la resilienza urbana attraverso un approccio di analisi spaziale. In particolare, la definizione del concetto di resilienza urbana rispetto ad eventi alluvionali è stata assunta come elemento preliminare per lo sviluppo di una metodologia quantitativa mirata alla valutazione della resilienza stessa, sulla base delle caratteristiche spaziali di città fluviali.

L'introduzione del concetto di resilienza urbana nell'ambito dei temi legati alla pianificazione territoriale risulta essenziale per lo sviluppo di sistemi urbani capaci di far fronte a possibili calamità naturali. Il complesso legame tra aree urbane e ambiente naturale ha assunto nel corso del tempo un ruolo significativo nel processo di urbanizzazione, dal momento che le attività antropiche e gli insediamenti urbani si sono progressivamente sviluppati in maniera da poter usufruire della disponibilità di risorse naturali. Allo stesso modo, la presenza di risorse idriche ha spesso significativamente influenzato lo sviluppo delle aree circostanti e, in generale, le aree urbane prossime ai corsi d'acqua ben esemplificano tale relazione. La presenza di insediamenti urbani prossimi ad elementi idrici rende indispensabile, da una parte, l'attuazione di azioni per la protezione di questi ultimi attraverso usi idrici appropriati e una adeguata salvaguardia della qualità delle risorse idriche, dall'altra, la protezione delle aree urbane periferiche da possibili eventi naturali calamitosi, limitando la probabilità di accadimento di tali fenomeni o mitigando i relativi potenziali danni. In riferimento a quest'ultimo aspetto, nonostante sia possibile ottenere una riduzione del rischio totale, le aree prossime ai corsi d'acqua sono inevitabilmente esposte al rischio di possibili eventi alluvionali e la vulnerabilità degli elementi esposti a tale rischio (e.g.: persone, attività, edifici o infrastrutture) può determinare diversi impatti. Mettendo in relazione la prevenzione del rischio alluvionale con la gestione delle emergenze e lo sviluppo della capacità di adattamento ai cambiamenti indotti da eventi alluvionali, si può ottenere un processo di gestione del rischio, strutturato durante tutte le fasi dell'evento (le condizioni precedenti e successive a quest'ultimo, nonché l'emergenza), sulla base del quale poter sviluppare una adeguata resilienza urbana rispetto a fenomeni alluvionali.

Potendo essere applicato a svariati campi di analisi, il concetto di resilienza assume nella letteratura tecnica diverse accezioni e caratteristiche, a seconda della specifica prospettiva da cui esso viene analizzato. In generale, la possibilità di configurare un sistema "resiliente" è connessa all'individuazione di adeguati metodi di valutazione di tale proprietà urbana, ovvero di una appropriata definizione del concetto stesso. Tuttavia, la mancanza di una definizione assoluta ed univoca si accompagna all'assenza di misure assunte come standard per la sua valutazione. Stime di resilienza, infatti, vengono spesso ottenute mediante l'applicazione di indicatori, definiti in relazione a specifici scopi di analisi, o attraverso giudizi qualitativi. Diverse sono le componenti del sistema urbano potenzialmente interessate da un evento alluvionale, nonché la diverse scale temporali in cui gli effetti dell'evento detto possono manifestarsi, determinando varie possibili conseguenze, tutte capaci di influenzare –seppur in diverso modo– il livello di resilienza. Gli aspetti sociali ed economici, il benessere sociale delle comunità colpite, le caratteristiche infrastrutturali delle strutture interessate da un dato fenomeno, sono alcuni degli elementi generalmente considerati per esaminare la capacità di un sistema di far fronte a possibili perturbazioni o crisi, quali possono essere le condizioni indotte da eventi alluvionali. In aggiunta agli aspetti descritti, le caratteristiche fisiche e funzionali dello spazio urbano possono contribuire a caratterizzare ulteriormente la resilienza urbana. Dal

punto di vista spaziale, infatti, le aree inondate modificano l'accessibilità spaziale all'interno del centro urbano colpito: data l'impossibilità di raggiungere le aree inondate in seguito ad eventi alluvionali, alcune tra le aree non colpite possono assumere un ruolo rilevante rispetto alla distribuzione dei flussi di movimento o, viceversa, possono perdere la loro funzione di collegamento spaziale. L'applicazione di un approccio di analisi spaziale allo studio della resilienza urbana può consentire di descrivere tali effetti, dal punto di vista funzionale, oltre che fisico e infrastrutturale.

Lo spazio urbano, infatti, è generalmente assunto come lo spazio risultante dalla distribuzione spaziale di infrastrutture ed edifici. Tuttavia, i principi e le diverse applicazioni dell'approccio configurazionale di Space Syntax mostrano come il layout dello spazio urbano possa considerevolmente influenzare l'uso e la percezione spaziale [1][2]. Secondo l'approccio detto, lo spazio assume quindi un ruolo di elemento di connessione tra la struttura fisica e sociale dell'ambiente urbano [3]. Space Syntax esamina, infatti, il layout degli spazi accessibili a partire dalla "configurazione spaziale" cui essi corrispondono, essendo quest'ultima intesa come l'insieme di tutte le connessioni spaziali tra gli spazi urbani [3]. La definizione del concetto di configurazione spaziale risulta essenziale per esaminare lo spazio dal punto di vista sintattico: il layout spaziale delle aree accessibili e la configurazione urbana possono influenzare la percezione dello spazio, con effetti sulla distribuzione spaziale dei flussi di movimento. Le attività antropiche andranno a localizzarsi laddove questi ultimi risultano maggiori, generando, a loro volta, ulteriori flussi di movimento e agendo da attrattori ai fini dell'economia di movimento [2]. Sulla base delle relazioni tra configurazione, movimento e attrattori, lo schema spaziale diviene così legato alla distribuzione delle attività antropiche e delle funzionalità spaziali, ovvero all'organizzazione spaziale urbana e all'uso dello spazio. La connessione tra le strutture spaziali e i relativi fenomeni urbani consente di ritenere che ciascuna variazione dello schema spaziale urbano possa ripercuotersi sull'uso dello spazio urbano e le sue funzionalità: la perdita di parti accessibili della griglia urbana si ripercuote in un diverso pattern di accessibilità spaziale, con variazioni delle proprietà sintattiche e delle relative centralità configurazionali. Considerando la presenza di aree inondate (ossia, aree non accessibili) come una perturbazione dello schema degli spazi accessibili e della struttura configurazionale urbana, le aree inondate possono, quindi, non solo determinare la perdita di spazi potenzialmente accessibili, ma anche influenzare l'uso delle rimanenti aree. Le tecniche operative di Space Syntax esaminano le caratteristiche sintattiche mediante misure topologiche di centralità, che costituiscono valori quantitativi detti "indici configurazionali" [2]. La correlazione statistica rilevata tra questi ultimi e i flussi di movimento [2] rende tali indici appropriati allo studio dei fenomeni urbani a partire dall'analisi degli schemi spaziali. La topologia della struttura configurazionale è operativamente studiata a partire da un insieme di segmenti rappresentativi delle connessioni visuali tra gli spazi urbani ed assumendo come impedenza spaziale il numero di cambi visuali che si verificano nel muoversi da un punto all'altro della griglia urbana [2][10]. Potendo descrivere la percezione spaziale e l'utilizzo dello spazio urbano attraverso valori quantitativi, l'applicazione dell'approccio configurazionale ad aree prossime a corsi d'acqua, ed esposte a rischio di eventi alluvionali, consente di esaminare in che modo le strutture urbane, la loro organizzazione spaziale e le relative proprietà configurazionali possono influenzare la resilienza del sistema a rischio rispetto agli eventi considerati. Gli approcci presenti nella letteratura tecnica, mirati ad esaminare la connessione tra le caratteristiche configurazionali e la resilienza delle strutture spaziali [4] [5][6] [7], analizzano differenti configurazioni e relative variazioni di queste ultime. Negli approcci detti, la resilienza è studiata sulla base dei cambiamenti indotti

nei valori degli indici di Space Syntax da una data perturbazione, o mediante indicatori di resilienza specifici ottenuti a partire da elaborazioni degli indici configurazionali. Tuttavia, nessuno di tali approcci presenti in letteratura risulta riferito al caso di eventi alluvionali, né i metodi di letteratura sviluppati per il confronto tra diverse configurazioni appaiono applicabili al caso degli eventi detti [8] [9]. Le configurazioni precedenti e successive ad un'alluvione in area urbana, infatti, corrispondono a sistemi diversi tra loro (in termini di struttura topologica, dimensioni ed organizzazione spaziale). Ne consegue la necessità di sviluppare una metodologia specifica per il confronto tra questi ultimi, così da poter esaminare le relazioni tra le strutture spaziali e i cambiamenti in esse indotti da eventi alluvionali. Inoltre, l'individuazione di una adeguata metodologia di valutazione della resilienza non può prescindere da una preliminare definizione del concetto stesso di resilienza, in stretta relazione con gli eventi alluvionali. A tale scopo, alcune caratteristiche di aree urbane prossime ai corsi d'acqua sono state considerate come elementi chiave. In particolare, nel caso la capacità di convogliamento di un corso d'acqua non risulti adeguata ad una data portata di piena, si può assumere che venga superata la resistenza del sistema fluviale, con conseguente inondazione delle aree limitrofe. A seconda della vulnerabilità di queste aree, l'evento indurrà cambiamenti nella struttura urbana, cui possono aggiungersi ulteriori variazioni spaziali determinate da possibili interventi sulla struttura urbana. Sulla base della relativa capacità di adattamento, il sistema urbano colpito raggiungerà un nuovo stato post-evento che, in futuro, potrà essere potenzialmente soggetto a possibili eventi di piena. Assumendo la resistenza del sistema fluviale, insieme con la vulnerabilità e la capacità di adattamento del sistema urbano, il concetto di resilienza risulta così riferito al sistema città-fiume nel suo complesso. Tale definizione ha consentito di assumere la resilienza come processo ciclico, ovvero come una proprietà dei sistemi urbani da poter sviluppare prima che si verifichi un evento calamitoso, per poi essere applicata in caso di eventi alluvionali. Sulla base della definizione concettuale descritta, è stata strutturata una metodologia per esaminare la resilienza urbana attraverso diverse fasi di analisi.

In particolare:

- Assumendo come sistema di studio le aree urbane prossime ad uno o più corsi d'acqua, la selezione degli spazi aperti accessibili consente di ottenere il relativo modello spaziale da analizzare mediante analisi di Space Syntax. La distribuzione spaziale dei relativi valori più elevati degli indici configurazionali fornisce un pattern di centralità urbane ("cores") [1]. Caratterizzando i cores in relazione alla posizione degli elementi fluviali, si ottiene una indicazione del ruolo che questi ultimi hanno assunto nel corso dello sviluppo urbano e rispetto alle funzionalità spaziali. L'analisi delle caratteristiche configurazionali di sistemi urbani periferici, nella loro attuale configurazione, fornisce quindi una conoscenza di base necessaria alla caratterizzazione di un sistema urbano potenzialmente esposto al rischio alluvionale.
- La modellazione idraulica di volumi idrici consente di definire le aree potenzialmente a rischio, al variare dell'entità dell'evento alluvionale (ovvero, della portata o del tirante idrico e del periodo di ritorno). La successiva analisi degli elementi interni alle aree a rischio permette poi di caratterizzare la vulnerabilità del sistema urbano, ovvero la tipologia e l'entità di possibili impatti di un dato evento alluvionale. Gli elementi di vulnerabilità, di cui le centralità configurazionali collocate all'interno delle aree a rischio costituiscono un importante aspetto, possono essere caratterizzati esaminando: i) la configurazione urbana: la distribuzione di frequenza delle misure sintattiche consente di valutare la percentuale di cores (ovvero, spazi aventi il 10% o 30% dei valori configurazionali più alti) all'interno di aree

potenzialmente a rischio. Tale misura è rappresentativa della suscettibilità delle aree configurazionalmente più rilevanti ad essere interessate dall'evento alluvionale. ii) morfologia urbana: i cores a rischio possono essere ulteriormente dettagliati tenendo conto dell'uso del suolo. Elevate percentuali di cores a rischio in aree fortemente urbanizzate restituiscono un sistema urbano particolarmente vulnerabile, con potenziali notevoli impatti sull'intera struttura configurazionale. iii) caratteristiche della griglia urbana e distribuzione della popolazione: la percentuale totale di cores a rischio costituisce una misura complessiva di elementi topologicamente significativi esposti al rischio. Il quadro degli elementi di vulnerabilità del sistema urbano può essere ulteriormente completato associando alla vulnerabilità della rete spaziale il valore di popolazione esposta al rischio (valutata come popolazione percentuale all'interno delle aree a rischio).

- L'esame delle aree non inondate consente di individuare le caratteristiche spaziali durante la fase di emergenza, come parte di una analisi post-evento. Le aree non affette dall'evento, infatti, forniscono un modello spaziale rappresentativo della condizione successiva al verificarsi dell'evento. Questo secondo schema spaziale (ovvero, la configurazione post-evento), insieme con le corrispondenti misure sintattiche e la localizzazione dei cores, restituisce un relativo nuovo pattern delle centralità urbane. La presenza di aree inondate, infatti, agisce come una perturbazione all'interno del sistema città-fiume, influenzando i valori e la distribuzione degli indici configurazionali all'interno della griglia urbana. Le caratteristiche configurazionali post-evento descrivono il ruolo sintattico che lo spazio urbano viene ad assumere in seguito alle calamità considerate. Pertanto, l'esame dello scenario post-evento e delle relative condizioni configurazionali permette di esaminare il sistema urbano nella sua potenziale configurazione successiva all'evento, così da dedurre le variazioni indotte dallo stesso rispetto alle funzionalità e alla percezione spaziale.
- Le differenze configurazionali tra le condizioni precedenti e successive ad un dato evento alluvionale sono indicative degli effetti dell'evento detto. Tuttavia, queste due configurazioni possono essere considerevolmente diverse tra loro (e.g.: le aree inondate possono determinare una riduzione dello spazio accessibile o, a seconda della conformazione delle aree inondate, le zone colpite possono indurre una divisione del sistema urbano in più sottosistemi isolati) e, pertanto, occorre un appropriato metodo di confronto tra queste, che consenta di ottenere informazioni significative a prescindere dalle specifiche caratteristiche delle strutture esaminate. Gli indici configurazionali normalizzati proposti da Hillier [11] -e le distribuzioni di frequenza di questi indici- possono consentire una prima comparazione tra configurazioni, così da individuare gli effetti dell'evento sulla struttura sintattica dell'area colpita. Allo scopo di studiare diverse strutture spaziali sulla base di un set di misure configurazionali (considerate nel loro insieme, e non singolarmente), è stata strutturata una procedura statistica mediante l'applicazione dell'Analisi delle Componenti Principali ("A.C.P.") [12] e, successivamente, dell'Analisi Cluster Gerarchica ("A.C.G.") [13]. Più in dettaglio, la prima consente di esaminare un numero elevato di variabili numeriche, statisticamente correlate tra loro (i.e. un insieme di indici configurazionali), così da definire un numero minore di nuove variabili ("componenti principali"), non correlate tra loro, in grado di rappresentare una considerevole percentuale della varianza delle variabili iniziali. L'analisi cluster gerarchica consente di individuare gruppi di elementi (i.e. spazi urbani) accomunati da valori simili delle variabili considerate (i.e. valori simili delle componenti principali, ovvero spazi con

caratteristiche configurazionali simili, queste ultime rappresentate dai valori delle componenti dette). L'elaborazione delle misure configurazionali mediante A.C.P. e A.C.G. permette di esaminare più indici, indipendentemente dalla struttura e dalle dimensioni dei modelli spaziali messi a confronto. Ne consegue un'analisi globale, cui corrisponde l'individuazione di classi di spazi urbani aventi in comune specifiche proprietà sintattiche. La localizzazione spaziale di tali classi permette di descrivere ed agevolmente identificare gli effetti e gli impatti di un dato evento alluvionale.

Le applicazioni della metodologia descritta sono molteplici, consentendo di adottare un approccio di analisi di scenario strutturato per fasi successive. Infatti, fornendo ciascuna fase di analisi indicatori numerici e adimensionali rappresentativi della resilienza urbana, la metodologia sviluppata risulta applicabile a diverse strutture urbane, indipendentemente dalla specifica area di studio, dalle relative estensione, posizione rispetto ai corsi d'acqua e organizzazione spaziale. Inoltre, la possibilità di applicare la metodologia per analizzare e confrontare diversi scenari di analisi consente di esaminare diverse condizioni urbane rispetto al relativo livello di resilienza. In particolare, le configurazioni studiate possono essere relative a diverse città prossime ai corsi d'acqua, messe a confronto sulla base della loro abilità di far fronte in maniera resiliente agli eventi alluvionali cui possono potenzialmente essere soggette. Diversi scenari di analisi possono anche essere ottenuti modellando differenti eventi, al variare del periodo di ritorno: per ciascun evento, l'applicazione della metodologia consente di individuare gli elementi di vulnerabilità della struttura sintattica e di descrivere la reazione post-evento del sistema, deducendo così una descrizione complessiva del livello di resilienza urbana. Le caratteristiche spaziali possono condizionare le dinamiche urbane e gli effetti di eventi alluvionali sulle strutture urbane di città fluviali, a loro volta, possono influenzare l'abilità del sistema città-fiume di far fronte agli eventi detti. Sulla base di tale considerazione, tenuto conto delle relazioni tra le strutture urbane e la resilienza esaminate nell'ambito dell'approccio sviluppato, ogni variazione di un dato layout spaziale può condizionarne la relativa resilienza. In particolare, gli interventi di sviluppo urbano, così come le misure strutturali, modificano il layout spaziale delle strutture urbane periferiche, determinando diversi schemi sintattici. Pertanto, esaminando questi ultimi attraverso la metodologia proposta, è possibile descrivere in che modo ciascuna azione sulla griglia urbana può influenzare la capacità del sistema urbano di far fronte ad eventi alluvionali, ovvero la relativa resilienza urbana. Le applicazioni descritte permettono di evidenziare come l'intero approccio metodologico presentato possa considerarsi uno strumento di supporto alla decisione, volto a strutturare strategie per lo sviluppo della resilienza urbana. Data la possibilità di valutare potenziali impatti di modifiche al sistema urbano, l'approccio detto può configurarsi anche come uno strumento di valutazione ex-ante, consentendo di valutare possibili effetti configurazionali di interventi sulla struttura urbana. Le aree urbane prossime ai corsi d'acqua costituiscono ambienti sensibili per i quali risultano necessarie appropriate strategie per la pianificazione territoriale, allo scopo di mettere insieme aspetti connessi ad elementi naturali, ambientali ed antropici. La definizione di adeguate metodologie per la stima della resilienza urbana contribuisce allo sviluppo della resilienza stessa rispetto a calamità naturali come parte integrante dei processi di sviluppo e pianificazione del territorio, consentendo uno sviluppo urbano sostenibile, nonché migliorando la gestione del rischio di eventi naturali calamitosi.