



Misurare la resilienza nella gestione del rischio inondazioni: il caso di San Mauro Torinese (TO)

Autrice: Alessandra Russo. Politecnico di Torino. r.alessandra182@gmail.com
Coautore: Giovanni Parisani. Politecnico di Torino. parisanig@gmail.com

Parole chiave: resilienza; gestione del rischio inondazioni; indicatori di resilienza; rischio di alluvioni

ABSTRACT

Lo scopo di questa ricerca è quello di indagare l'utilità del concetto di resilienza nella gestione del rischio di alluvioni. Alla base di questo lavoro c'è l'applicazione dell'approccio sistemico di valutazione della resilienza dei sistemi fluviali di pianura, teorizzato dall'Ing. K. M. de Bruijn nel 2005, al sistema di gestione del Po per il tratto del fiume che attraversa il Comune di San Mauro Torinese. Per comprendere se l'applicazione del concetto di resilienza facilita lo sviluppo di strategie alternative nella gestione del rischio inondazioni, viene prima fornita una definizione di resilienza applicabile all'ambito di ricerca. Secondo questo approccio, la resilienza viene considerata come una caratteristica del sistema che si manifesta in seguito ad un disturbo (la piena), e che si esprime attraverso la risposta del sistema al disturbo (danni) e il tempo che esso impiega a ritornare ad uno schema di sviluppo non più disturbato (valore qualitativo). Il sistema di cui si valuta questa caratteristica è rappresentato dalla combinazione tra il fiume (regime di portata) e l'adiacente piana inondabile (descritta attraverso le sue caratteristiche fisiche, economiche e sociali). Secondo il modello olandese, la resilienza del sistema può essere descritta attraverso tre indicatori di reazione: ampiezza, gradualità e tasso di recupero.

1. Introduzione

L'Italia è un paese particolarmente vulnerabile alle inondazioni e alle frane. I dati dell'ultimo rapporto del MATTM (2018) rivelano infatti che il 91,1% dei comuni italiani è esposto a livelli di rischio idrogeologico elevato e molto elevato, e che di questi il 23,4% è esposto a fenomeni di carattere alluvionale più, o meno frequenti. Tuttavia nonostante secoli di esperienza nella gestione del rischio alluvioni, le esondazioni dei fiumi di pianura causano ancora danni devastanti al territorio. Durante gli ultimi vent'anni, nel dibattito internazionale sui disastri naturali è emersa la necessità di riconsiderare le strategie di gestione comunemente applicate (prevalentemente affidate a soluzioni di carattere strutturale), e di elaborare strategie alternative. Come soluzione potenziale è cresciuto l'interesse verso la *resilienza* e verso l'idea che la gestione del rischio disastri possa essere migliorata aumentando la resilienza dei sistemi. Tuttavia, che cosa si intenda definitivamente per "sistema resiliente", è ancora oggi al centro della consistente letteratura a riguardo. Ciò che invece emerge senza equivoci, è che il concetto di resilienza abbia una connotazione positiva. In questa ricerca è stata verificata questa connotazione positiva della resilienza, attraverso l'applicazione dell'approccio sistemico di valutazione della resilienza per i fiumi di pianura teorizzato dall'olandese K. M. de Bruijn (2005), sul sistema di gestione del rischio di alluvioni del Comune di San Mauro Torinese (TO), attraversato dal fiume Po. Per valutare i potenziali benefici derivanti dall'applicazione del concetto di resilienza, viene dapprima data una definizione del concetto applicabile nel campo della gestione del rischio di alluvioni, ed in secondo luogo, la resilienza viene quantificata analizzando la reazione del sistema alle portate di piena attraverso l'applicazione di tre indicatori di reazione: ampiezza, gradualità e tasso di recupero.

Lo scopo di questa ricerca è di stabilire, da un lato, se il tentativo di quantificare la resilienza attribuendole delle specifiche declinazioni risulti efficace nel rendere operativo il concetto stesso, e dall'altro, se l'applicazione del concetto di resilienza, attraverso un approccio integrato di valutazione, faciliti lo sviluppo di strategie alternative, suggerendo così un percorso diverso alla gestione locale del rischio di alluvioni.

Questa ricerca è stata realizzata come tesi di Laurea Magistrale in Pianificazione territoriale, urbanistica e paesaggistico-ambientale, conseguita dall'autrice presso il Politecnico di Torino. I risultati ottenuti saranno ridiscussi in una ulteriore ricerca (in corso d'opera) in collaborazione con l'Ing. Stefano Ferrari, ricercatore universitario presso il Dipartimento Intrateneo di Scienze, Progetto e Politiche del Territorio del Politecnico di Torino.

1.1 Definizioni e focus della ricerca

Il modello applicato di valutazione della resilienza, riguarda solo le esondazioni dei fiumi di pianura. I fiumi di pianura sono caratterizzati da pendenze relativamente basse, un innalzamento lento del livello dell'acqua e un deflusso che attraversa una zona prevalentemente pianeggiante. Le *alluvioni* possono essere definite come inondazioni di aree che generalmente sono asciutte.





L'area di interesse è il *sistema di gestione del rischio di alluvioni*, che consiste nella combinazione tra il fiume di pianura e l'adiacente piana inondabile, comprendendo sia le caratteristiche fisiche che socio-economiche di quest'area. Sulla base di un approccio sistemico, si assume dunque che il *sistema socio-economico*, ovvero il sistema in cui le persone agiscono, e il *sistema fisico*, che include le strutture naturali e artificiali, insieme formino un *unico sistema integrato*. La *gestione del rischio alluvioni* viene intesa come l'insieme di quelle attività che mirano a migliorare e a mantenere le capacità di una regione di far fronte alle onde di piena. In questa ricerca il *rischio di alluvioni* è definito come l'impatto annuale previsto dovuto alle inondazioni. Questo è calcolato come la sommatoria del prodotto delle probabilità dei possibili eventi alluvionali e dei corrispondenti impatti (paragrafo 3.1).

2. Un approccio sistemico di valutazione della resilienza nella gestione del rischio inondazioni

Seguendo l'assioma secondo cui "ciò che può essere misurato può essere gestito", la capacità di misurare la resilienza viene sempre più identificata come un passo fondamentale verso la riduzione del rischio catastrofi (Fekete e Fiedrich, 2018 in Khazai et al., 2018). La misurazione proposta attraverso il modello olandese, basata sull'utilizzo di un set di indicatori prescritti e comprendente uno spettro di analisi di carattere sia quantitativo che qualitativo, è utile non solo a valutare e confrontare le condizioni di base di ciò che rende resilienti i sistemi di gestione del rischio di alluvioni dei fiumi di pianura, ma anche ad aiutare a comprendere quali fattori influenzano negativamente la capacità di tali sistemi e delle comunità che ne fanno parte, di rispondere e di recuperare dagli effetti di un evento catastrofico di piena.

2.1 Indicatori di reazione come indicatori di resilienza

Le portate di piena, variabili e incerte, generate a monte di un bacino idrogeologico, esercitano un *disturbo* sul sistema di gestione del rischio di alluvioni. Il sistema può *rispondere* in modi diversi alle portate che in esso fanno ingresso. Queste possono non provocare alcuna reazione (per esempio nel caso di un sistema con argini sufficientemente alti). Al contrario, può succedere che le piene causino un'esondazione del fiume provocando l'interruzione dell'attività sociale ed economica, danni ai beni privati e pubblici, shock emotivi o ancora distruzione degli ecosistemi. Il *recupero* della società da questa rottura, consiste nel ritorno ad un normale modello di sviluppo. Ciò significa che almeno i livelli di sviluppo economico, sociale e fisico dovrebbero essere simili ai livelli precedenti l'alluvione o comparabili con quelli di aree che non hanno subito l'inondazione. Risposta e recupero rappresentano la reazione del sistema al disturbo. Nel modello olandese applicato, il disturbo viene analizzato attraverso l'intero regime di portata che interessa il sistema di gestione esaminato. La gamma di portate di piena considerata per il caso studio, comprende portate con tempo di ritorno di 20 – portata di progetto – 100, 200 e 500 anni (Tabella 1).

Tabella 1. Regime di portata del Po a San Mauro Torinese (*Piano di Tutela delle Acque*, Regione Piemonte, 2007)

Q ₂₀ [m ³ /s]	Q ₁₀₀ [m ³ /s]	Q ₂₀₀ [m ³ /s]	Q ₅₀₀ [m ³ /s]
2835	3600	4360	4600
portata di progetto		Alluvione del 2000	

Per comprendere il comportamento del sistema al disturbo, bisogna conoscere l'entità del disturbo in relazione all'intera gamma di grandezze di piena. Analizzando la reazione del sistema alle piene è possibile conoscere due caratteristiche fondamentali del sistema: la resistenza e la resilienza.

In questa ricerca la resistenza viene definita come la capacità del sistema di resistere ai disturbi restando imperturbabile, mentre la resilienza come la capacità del sistema di recuperare dagli impatti delle inondazioni (de Bruijn, 2005). La resistenza pertanto determina che le portate di piena possano fluire normalmente attraverso il sistema di gestione senza causare esondazioni, mentre la resilienza determina la capacità del sistema di recuperare in seguito agli impatti delle inondazioni, dove per recupero non si intende il ritorno all'identica condizione precedente l'evento alluvionale, ma ad una condizione in cui è assente il disturbo e gli effetti negativi delle inondazioni si sono esauriti. La resistenza viene dunque rappresentata dalla "soglia di reazione", la quale corrisponde al livello di disturbo massimo che il sistema può subire senza reagire. Nell'ambito della gestione del rischio di alluvioni questa soglia di reazione è definita come il tempo di ritorno di una determinata portata (detta portata di progetto) per cui ci si aspetta che non si verificherà alcun danno.

La resilienza del sistema viene invece valutata attraverso tre indicatori di reazione: (1) l'ampiezza della reazione, che rappresenta la misura dell'entità della reazione al disturbo, (2) la gradualità della reazione, ovvero quanto si incrementa la reazione all'aumentare del disturbo e (3) il tasso di recupero, che indica la velocità con cui il sistema è capace di recuperare dagli impatti delle inondazioni facendo ritorno ad una condizione 'normale'.

L'*ampiezza* della reazione è definita come la magnitudo della reazione al disturbo e corrisponde all'entità dell'impatto atteso risultante da una certa portata di piena, immediatamente dopo il verificarsi di un'alluvione. Nel modello di de Bruijn vengono considerati solo gli impatti primari diretti tangibili causati dalla forza distruttiva dell'acqua. Pertanto, la magnitudo della reazione al disturbo per un intero regime di portate di piena si traduce in termini di perdite economiche





e di vite umane attraverso due numeri: l'Expected Annual Damage (EAD – Danno Atteso Annuo) e l'Expected Annual Number of Casualties (EANC – Numero Atteso di Vittime Annuo). Per calcolare entrambi i numeri deve essere determinato il rapporto tra tutte le possibili portate al colmo di piena (dalla portata di progetto con più alta probabilità di accadimento e danno zero, alla portata con tempo di ritorno di 500 anni), con gli impatti corrispondenti e le loro probabilità di accadimento, secondo le seguenti equazioni:

$$EAD = \int_{1/500}^{P(D=0)} PD(P)dP \quad [1]$$

$$EANC = \int_{1/500}^{P(D=0)} PC(P)dP \quad [2]$$

Dove:

P = probabilità annua inondazione

D(P) = danno atteso in funzione della probabilità (€)

C(P) = numero di vittime in funzione della probabilità (n°)

Il danno in una certa posizione e con un determinato uso del suolo, viene calcolato come il prodotto del valore massimo di esposizione per l'estensione dell'area interessata, per un fattore di danno che varia da zero ad uno a seconda dell'altezza raggiunta dall'acqua. Il danno totale viene calcolato come la somma dei danni per tutte le categorie di uso del suolo, secondo l'equazione:

$$D = \sum_{c,l} (\alpha_{c,l} * A_{c,l} * E_{max,l}) \quad [3]$$

Dove:

$\alpha_{c,l}$ = fattori di danno in funzione dell'uso del suolo (l) e della altezza idrica (c)

$A_{c,l}$ = area di un determinato uso del suolo (l) e di una determinata altezza idrica (c)

$E_{max,l}$ = valore massimo di esposizione in funzione dell'uso del suolo (l)

Noto il valore del danno atteso per le rispettive portate considerate, è possibile ottenere il danno medio atteso annuo utilizzando la probabilità di accadimento come criterio di pesatura. Il calcolo per il numero di vittime medio annuo si ottiene seguendo la stessa logica, ma sostituendo il valore massimo di esposizione (€) con il numero massimo di persone coinvolgibili per ogni edificio residenziale. I fattori di danno che dipendono dalla profondità dell'allagamento, variano a seconda della categoria di bene esposto.

La *gradualità* della reazione è definita come la relazione tra l'aumento del danno all'aumentare della portata. Questo aspetto viene quantificato comparando il relativo aumento di portata in percentuale ed il corrispondente aumento del danno. L'indicatore ha un valore compreso tra zero e uno. È vicino allo zero quando un piccolo aumento di portata provoca un brusco aumento del danno, è vicino ad uno quando la portata cresce linearmente con il danno. La gradualità della reazione viene calcolata attraverso la seguente equazione:

$$\text{Gradualità} = 1 - \sum_{n=1}^{n=N} \frac{|\Delta Q'_n - \Delta D'_n|}{200} \quad [4]$$

$$\text{Con:} \quad \Delta Q'_n = Q'_n - Q'_{n-1} = \left[\frac{100 * (Q_n - Q_{min})}{Q_{max} - Q_{min}} \right] - \left[\frac{100 * (Q_{n-1} - Q_{min})}{Q_{max} - Q_{min}} \right]$$

$$\Delta D'_n = D'_n - D'_{n-1} = \left[\frac{100 * (D_n - D_{min})}{D_{max} - D_{min}} \right] - \left[\frac{100 * (D_{n-1} - D_{min})}{D_{max} - D_{min}} \right]$$

Dove:

Q' = porta relativa (%), Q = portata (m³/s)

$Q_{max} = Q(P = 1/500)$, Q_{min} = portata di progetto (P = 1/20)

D' = danno relativo (%), D = danno (M€) in funzione di Q, $D_{max} = D(Q_{max})$, $D_{min} = 0$

n = ranking number del livello di portata

Ci si aspetta che la risposta cresca proporzionalmente al disturbo. Un'improvvisa discontinuità della reazione risposta-disturbo rappresenta di solito un evento improvviso e dunque indesiderabile.

Il *tasso di recupero* indica la velocità con cui il sistema ritorna ad uno schema di sviluppo paragonabile a quello dei sistemi non disturbati. La durata del periodo di recupero dipende dall'entità del danno e dal contesto in cui si verifica. Poiché la dimensione del danno è già inclusa nel parametro dell'ampiezza, l'indicatore descrive solo quei fattori che influenzano il tasso di recupero e non quelli che descrivono la predisposizione del sistema all'impatto negativo della piena. Si assume che la capacità di recupero del sistema di gestione del rischio alluvioni dipenda da fattori fisici, economici e sociali. I *fattori fisici* si riferiscono a quanto tempo impiega l'area inondata per asciugarsi e se l'acqua defluisce per gravità o deve essere aspirata. I *fattori economici* si riferiscono alla capacità di reperire denaro sufficiente per la riparazione dei danni e per la ricostruzione, e alla possibilità di diffusione degli effetti in aree non allagate a causa dell'interruzione delle infrastrutture cruciali. Infine, i *fattori sociali* che influenzano il recupero sono suddivisi in





tre gruppi di variabili. Il primo gruppo riguarda la struttura politica, la fiducia nel governo, l'equità e la strutturazione sociale. Il secondo gruppo fa riferimento alla consapevolezza e alla preparazione al rischio di alluvioni, nonché al livello di gestione delle emergenze, l'ultimo gruppo si riferisce al Capitale umano. Nel modello applicato i fattori descritti vengono valutati attraverso delle tabelle (vedi PPT) secondo un approccio qualitativo, su una scala di valori che va da 0 a 10, per poi ricavarne una media. Ciò sta a significare che ogni categoria di fattori ha la stessa importanza. Quantificando tutti e tre gli aspetti che descrivono la reazione del sistema alle portate di piena, si ottiene una indicazione della capacità di recupero del sistema. Ogni indicatore riflette un solo aspetto della reazione. Pertanto, la resilienza deve essere valutata considerando l'intero set di indicatori. Gli indicatori mostrano chiaramente quale aspetto della reazione ostacola il rapido recupero: o le ampiezze sono troppo grandi, o la gradualità è troppo piccola oppure il tasso di recupero è troppo basso.

3. Applicazione del modello al caso studio

A differenza della ricerca originale in cui il modello proposto è stato applicato a casi in scala di bacino, in questa ricerca si è scelto di applicare il modello su un caso di scala locale. Le ragioni di questa scelta risiedono da un lato, nel fatto che la dimensione comunale è quella in cui la gestione del rischio assume connotati più strettamente operativi, dall'altro nella volontà di valutare la versatilità del modello stesso e dunque la sua effettiva utilità nella gestione del rischio di alluvioni.

3.1 Simulazione dell'inondazione e il calcolo dell'ampiezza attraverso ArchMap

Il punto di partenza dell'analisi consiste nella simulazione idraulica delle piene. Lo scopo di tale simulazione è quello di risalire ai livelli di allagamento, sia in termini areali che in termini altimetrici, fondamentali per la stima del danno atteso. Per quanto riguarda la delimitazione delle aree allagabili per i diversi scenari alluvionali riportati in Tabella 1, è stato fatto riferimento alle *Mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni* (disponibili sulla piattaforma *web gis* del CSI Piemonte – GIS-BROWSER) contenute nel PGRA del Bacino del Po, per scenari alluvionali con tempi di ritorno di 100 e 500 anni, mentre per lo scenario alluvionale con tempo di ritorno di 200 anni è stata utilizzata la perimetrazione dell'area allagata durante l'Alluvione del 2000. Nota la dimensione areale dell'allagamento per l'intero regime di portata, sono state calcolate le altezze idriche. Questa operazione è stata effettuata in ambiente ArcMap ed è stata ripetuta per ogni area allagabile. Di seguito viene descritto il processo effettuato:

1. Estrazione dal DTM della Regione Piemonte, relativo solo all'area allagabile considerata, con risoluzione della griglia di 5 m, delle curve di livello ogni 0,2 m (Spatial Analyst --> Surface Analysis --> Contour);
2. Individuazione della quota massima (Qmax) di tali curve, lungo il perimetro delle aree allagabili. Tale quota rappresenta il punto di massima altezza in cui il piano dell'acqua interseca il terreno;
3. Sottrazione tramite "Raster Calculator" tra la quota massima (Qmax) e il DTM corrispondente all'area allagabile (Spatial Analyst --> Raster Calculator --> Qmax – DTM). Si ottiene così un raster (DTM liquido) che rappresenta la *soggiacenza* (y[m]) dell'acqua rispetto alla quota del terreno;
4. Conversione del DTM liquido da raster a vettore (Conversion Tool --> From Raster --> Raster to Polygon).

L'oggetto vettoriale così ottenuto, contiene come unica informazione la profondità raggiunta dall'acqua in ogni punto dell'area allagabile. La Figura 1 e la Figura 2 (elaborazioni personali) rappresentano rispettivamente la simulazione dell'allagamento per gli scenari alluvionali con tempo di ritorno 200 (Alluvione 2000) e 500 anni (Mappe).

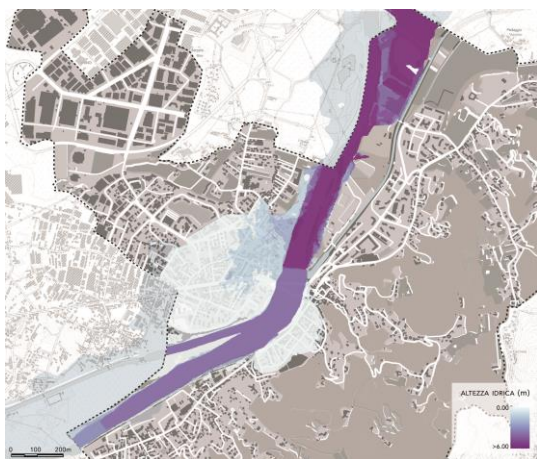


Figura 1. Altezze di allagamento con TR 200 anni

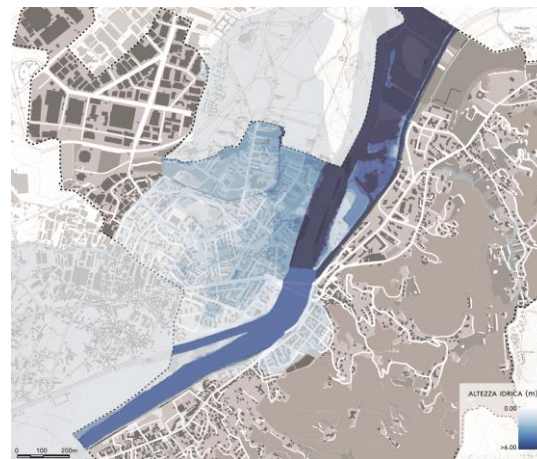


Figura 2. Altezze di allagamento con TR 500 anni





Note le altezze di allagamento, per calcolare il danno atteso è stato necessario a questo punto attribuire l'informazione altimetrica dell'acqua ai beni esposti ricadenti nelle aree allagabili suddivisi per categorie. Le categorie di beni coinvolte (nel caso dell'Alluvione del 2000) o coinvolgibili dall'inondazione (per gli scenari alluvionali con tempo di ritorno di 100 e 500 anni) sono:

- Residenziale
- Industriale
- Agricolo
- Infrastrutture stradali

L'individuazione dei beni esposti per categorie di uso del suolo è stata effettuata sulla base dei dati della BDTRE (del 2018) della Regione Piemonte (da cui è stato possibile ricavare $A_{c,i}$). Per poter procedere con l'analisi, ad ogni tipologia di bene esposto sono state associate le altezze idriche di allagamento, in funzione delle quali è stato possibile attribuire i coefficienti di danno ($\alpha_{c,i}$). I coefficienti di danno utilizzati, sono tratti dalle curve di danno relative elaborate dall'HKV Consultants nel 2007 in un report tecnico mai pubblicato, ma in parte reso noto da Farinosi et al. (2012) e da Frongia et al. (2016). Tali curve, dette *curve fattori di danno-profondità* (Figura 3), sono curve armonizzate che descrivono il danno frazionario in funzione della profondità dell'acqua, per una varietà di classi di uso del suolo, sulla base di una media continentale europea.

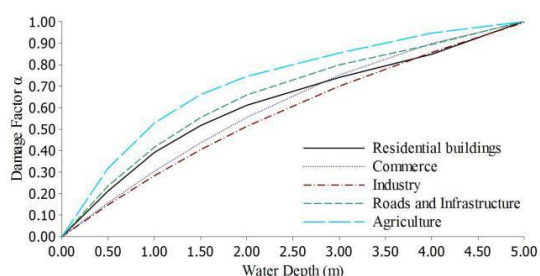


Figura 3. Funzioni di danno relative armonizzate valide per l'UE (da Frongia et al., 2016)

Queste "funzioni medie" individuate dall'HKV Consultants associano 8 altezze idriche (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0) ad altrettanti coefficienti di danno, i quali esprimono la percentuale del danno con valori da 0, nessun danno, ad 1, danno totale. Sulla base del suddetto studio sono stati individuati anche i valori massimi di esposizione per ciascuna classe di uso del suolo ($E_{max,i}$ espressi in €/m²) validi per l'Italia. Nella Tabella 2 vengono riassunti i coefficienti di danno per le diverse categorie di uso del suolo considerate e i relativi valori massimi di esposizione.

Tabella 2. Coefficienti di danno per categorie di beni esposti in funzione delle altezze idriche di allagamento e valori massimi di esposizione (€/m²).

Water depth (m)	Fattori di danno ($\alpha_{c,i}$)			
	Residenziale	Agricola	Industriale	Infrastrutture stradali
0	0	0	0	0
0.5	0.23	0.27	0.15	0.23
1	0.40	0.50	0.28	0.42
1.5	0.52	0.58	0.40	0.56
2	0.62	0.74	0.50	0.66
3	0.74	0.86	0.70	0.80
4	0.85	0.92	0.85	0.90
5	0.98	0.98	1	0.98
6	1	1	1	1
	Valori massimi di esposizione $E_{max,i}$			
	618	0.63	440	20

Incrociando le funzioni di danno frazionario, che consentono di determinare la percentuale di risorsa danneggiata a profondità di piena specifica, con il valore massimo di esposizione, si dà luogo al valore di danno atteso per ciascuna categoria per ogni area allagabile. Anche questa parte dell'analisi è stata effettuata in ambiente ArcMap. Infatti, le informazioni altimetriche dell'allagamento contenute nel dato vettoriale ottenuto dalla conversione del DTM liquido (punto 4), sono state attribuite ai singoli beni ricadenti nelle aree allagabili, a cui successivamente sono stati associati i coefficienti di danno e i valori massimi di esposizione, per ogni singola categoria. Riassumendo il processo seguito:





5. Attribuzione per posizione delle altezze idriche agli shapefile contenenti le superfici ($A_{c,i}$) dei beni esposti ricadenti nelle aree allagabili, individuati sulla base della BDTRE del 2018 (Analysis Tool --> Spatial Join --> Match Option: Intersect);
6. Creazione dei nuovi campi attributo: coefficienti di danno in funzione delle altezze idriche ($\alpha_{c,i}$) così come riportati in tabella ; valori massimi di esposizione distinti per categoria di bene ($E_{max,i}$) così come riportati in tabella;
7. Creazione nuovo campo attributo D per ogni categoria considerata, basato sull'operazione: $[E_{max,i} * A_{c,i} * \alpha_{c,i}]$;
8. Sommatoria $\Sigma_{c,i}$ del danno atteso per tutte le classi di uso del suolo considerate per ogni area allagabile.

Conosciuto il valore del danno atteso totale per ogni area allagabile considerata (TR: 100; 200; 500 anni) è stato a questo punto possibile il calcolo dell'Expected Annual Damage, associando ai risultati ottenuti le rispettive probabilità di accadimento. L'equazione [1] diventa:

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^K D[i] * \Delta P_i \quad \text{Con:} \quad D[i] = \frac{D(P_{i-1}) + D(P_i)}{2} \quad \text{e} \quad \Delta P = |P_i - P_{i-1}| \quad [5]$$

Dove:

\bar{D} è il danno medio atteso annuo

$D[i]$ è il danno medio relativo a due punti "i-1" e "i"

ΔP è la probabilità di accadimento dell'intervallo dei suddetti punti

I punti "i" rappresentano i tempi di ritorno dei differenti scenari alluvionali considerati.

Dall'analisi effettuata deriva che per portate di piena più frequenti, nell'ordine dei 3600 m³/s (Tabella 1), l'unica categoria di uso del suolo esposta è quella agricola, con un danno atteso di circa 15000 €. Per portate di piena meno frequenti, dell'ordine dei 4360 m³/s (portata dell'alluvione del 2000 a San Mauro), il danno massimo atteso è risultato di circa 33 M€ e riguarda le seguenti categorie: edifici residenziali, agricoltura e infrastrutture stradali. Infine per portate di piena di rara frequenza di circa 4600 m³/s, il danno massimo atteso coinvolge tutte le categorie di beni elencate in precedenza ed è pari a circa 109 M€. Si ricorda che la portata di progetto, pari a 2835 m³/s, non provoca esondazioni, pertanto il danno atteso è pari a 0.

Noti dunque i valori dei danni attesi per l'intero regime di portata, e ricordando che la probabilità di accadimento è l'inverso del tempo di ritorno, l'equazione [5] può essere risolta nel seguente modo:

$$\bar{D} = \frac{\{ [D(P_{200}) + D(P_{500})] * (0.005 - 0.002) + [D(P_{100}) + D(P_{200})] * (0.01 - 0.005) + D(P_{50}) + D(P_{100}) \} * (0.02 - 0.01)}{2}$$

Il danno atteso medio annuo da alluvione del Comune di San Mauro Torinese risulta essere all'incirca di **295 mila €** e corrisponde alla monetizzazione annua media del rischio. Per calcolare il numero medio di vittime attese annue è stata dapprima calcolata la densità abitativa del Comune in abitanti/m². Sapendo che il numero degli abitanti di San Mauro è pari a 19.048 e che la superficie totale residenziale equivale a 580.559 m², ne deriva una densità abitativa di circa 0,03 ab/m². Moltiplicando la densità abitativa con la superficie dei singoli edifici si ottiene il numero di abitanti per ogni edificio, che rappresenta il numero di persone coinvolgibili dall'evento di piena. Moltiplicando, questo numero con i coefficienti di danno (vulnerabilità; Tabella 4) in funzione delle altezze idriche, è possibile ottenere il numero di vittime attese per ogni edificio residenziale.

Tabella 4. Coefficienti di danno relativi agli individui in funzione dell'altezza idrica di allagamento

Water depth [m]	0-2	3	4	5	6
Perdite	0	0.10	0.50	1	1

Applicando la formula [5], sostituendo al danno atteso il numero di vittime attese per ogni area allagabile, si ottiene che il numero medio di vittime attese annue per il caso esaminato è di quasi **1 vittima**.

3.2 Gradualità della reazione

La gradualità indica come il danno cresce all'aumentare della portata di piena. Nel caso studio la gradualità della reazione è molto bassa. Infatti, portate con probabilità di accadimento di 1/20 non provocano alcun danno, mentre portate con probabilità di accadimento di 1/500 anni causano danni enormi. L'indicatore della gradualità è stato calcolato applicando l'equazione [4]. Conoscendo l'intera gamma di portate e i relativi danni, la gradualità della reazione del sistema di gestione del rischio per il caso considerato risulta essere pari a **0.29**.

3.3 Tasso di recupero e preparazione dei cittadini





Come detto in precedenza, il tasso di recupero di una reazione alle onde di piena corrisponde alla capacità di un sistema di recuperare, passando da uno stato in cui sono visibili gli impatti delle inondazioni, ad uno stato del sistema in cui è assente il disturbo. Questa capacità di recupero è stata valutata qualitativamente in relazione ai tre gruppi di fattori (fisici, economici e sociali), sulla base del confronto tra dati statistici, report tecnici, documenti ufficiali, osservazioni e strumenti di gestione e di pianificazione delle emergenze.

In questa ricerca l'indicatore del tasso di recupero è stato parzialmente modificato. Infatti, per quanto riguarda la stima dei fattori sociali, le variabili originariamente raggruppate in tre categorie, sono state separate e valutate singolarmente. Inoltre, il gruppo di variabili che in partenza indicava la consapevolezza, la preparazione al rischio e la gestione delle emergenze, è stato modificato in "pianificazione della gestione del rischio di alluvioni e gestione delle emergenze", ed è stata aggiunta una nuova variabile, quella della "preparazione e consapevolezza del rischio di alluvioni dei cittadini". Si è ritenuto opportuno dettagliare maggiormente questa parte del modello per renderla più coerente con la dimensione locale dell'analisi. Inoltre, si è voluto sottolineare attraverso questa modifica il *gap* comunicativo tra la pianificazione delle emergenze e i contenuti dei propri strumenti – in questo caso del Piano Comunale di Protezione Civile del Comune di San Mauro – e il reale livello di conoscenza di questi contenuti da parte dei cittadini, ovvero coloro a cui i piani sono rivolti.

Aumentare la preparazione ai disastri naturali implementando attività di pianificazione dell'emergenza e promuovendo l'adozione da parte dei cittadini di specifici comportamenti protettivi, è essenziale tanto quanto mitigare il rischio attraverso opere ingegneristiche o architettoniche (Miceli et al., 2007). Attraverso un questionario costruito *ad hoc* sulla realtà sanmaurese, è stato verificato: a) il livello di conoscenza delle procedure di emergenza indicate nel piano; b) la preparazione dei cittadini alle alluvioni nelle diverse fasi dell'emergenza; c) il livello di percezione del rischio alluvioni della comunità.

Il questionario, somministrato a 97 cittadini di San Mauro (campione probabilistico auto-selezionato), è stato in parte strutturato su domande a risposta chiusa di carattere politomico e diatomico o basate su scale numeriche e verbali, in parte organizzato con domande a risposta aperta. Sono state raccolte inoltre informazioni esperienziali degli intervistati intorno ad un evento target – l'Alluvione del 2000 – introdotto per accompagnare i giudizi di probabilità di accadimento dell'evento rischioso e i sentimenti di preoccupazione ad esso connessi. L'evento target è stato utile anche per valutare la preparazione degli intervistati, attraverso la richiesta di elencare una serie di comportamenti protettivi che essi adotterebbero o hanno adottato in caso di pre-allarme, allarme e cessato allarme alluvioni. La valutazione del livello di conoscenza dei dispositivi di emergenza da parte dei cittadini, si è basata sulla capacità di distinguere i segnali di allarme emessi dalle sirene presenti sul territorio comunale e sulla conoscenza dell'ubicazione dell'Area di Protezione Civile in caso di allarme. Infine, è stato chiesto agli intervistati di esprimere un giudizio da 0 a 4 sull'importanza del ruolo dell'Amministrazione Comunale nella preparazione dei cittadini a questo tipo di eventi. I risultati del questionario hanno rivelato che in media i cittadini intervistati hanno una corretta percezione del rischio a cui è esposto il proprio territorio (65.5 %), ma che allo stesso tempo quasi la totalità del campione non sa elencare uno o più di un comportamento protettivo da adottare in caso di alluvioni. Inoltre, è risultato che solo il 37% degli intervistati è capace di distinguere i segnali emanati dalle sirene, mentre la restante parte o non li sa distinguere oppure non ne è a conoscenza. Il risultato peggiore emerge sulla domanda su dove verrebbe allestita l'Area di Protezione Civile, a cui nessuno degli intervistati ha saputo rispondere correttamente. Infine, quasi il 68% degli intervistati ritiene che il ruolo dell'A.C. sia determinante nella preparazione al rischio alluvioni dei cittadini.

Nel complesso, la capacità di recupero sociale del sistema di gestione del Comune di San Mauro totalizza 6. In generale tutte le variabili che costituiscono questo gruppo di fattori ottengono punteggi mediamente alti, ma il risultato totale è fortemente penalizzato dallo scarso punteggio attribuito all'indicatore introdotto. I fattori fisici che influenzano il tasso di recupero del sistema totalizzano un punteggio pari a 7, in quanto la piana inondabile impiega poco tempo per tornare asciutta e senza la necessità di grossi interventi esterni. Infine, la capacità economica di riparare i danni e di impedire la diffusione degli effetti economici è stata valutata con un 6.

Globalmente il tasso di recupero del sistema di gestione del rischio di alluvioni di San Mauro è pari a 6.

4. Discussione dei risultati e conclusioni

L'analisi effettuata può essere letta come un contributo alla conoscenza della resilienza del sistema di gestione del rischio di alluvioni, per il tratto di pianura del fiume Po che interessa il Comune di San Mauro Torinese. I dati ottenuti dall'applicazione del modello olandese al caso studio mostrano una bassa resilienza del sistema, dovuta ad un elevato valore di ampiezza (EAD = circa 295 mila €/anno; EANC = circa 1 vittima/anno), una bassa gradualità (0.29) e un sufficiente tasso di recupero (6).

Il modello sistemico di valutazione della resilienza proposto dall'idrologa olandese K. M. de Bruijn, fornisce uno schema d'analisi capace di indagare il fenomeno delle inondazioni su diversi livelli, partendo dall'analisi del rischio nella dimensione concreta del danno, ed estendendo la lettura del fenomeno alle tre dimensioni chiave della sostenibilità, ovvero la dimensione ambientale, economica e sociale. Questo aspetto del modello offre il vantaggio di attribuire al fenomeno distruttivo sia una dimensione spaziale che temporale, fornendo un quadro generale di informazioni determinanti nella gestione del rischio di alluvioni, su cui basare politiche e strategie locali di mitigazione. L'applicazione del concetto di resilienza come asserito in questa ricerca, si inserisce in una specifica visione della





gestione del rischio di alluvioni, secondo cui il fiume e gli aspetti fisici, sociali ed economici della corrispondente piana allagabile, devono essere considerati come elementi che costituiscono un unico sistema. Comprendere come il sistema risponde al disturbo provocato dalle piene e la relazione tra le alluvioni e la società, aiuta a valutare gli effetti delle misure adottate e a progettare strategie che si adattino al funzionamento della società. Secondo l'approccio sistemico di valutazione adottato, la resilienza non può essere quantificata attraverso un solo numero, ma considerando l'intero set di indicatori. Gli indicatori contengono informazioni complementari ma differenti, pertanto, solo la loro combinazione può fornire una conoscenza sufficiente della capacità del sistema di ritornare ad un modello di sviluppo non disturbato. Quantificando i diversi aspetti della reazione, gli indicatori suggeriscono quale aspetto deve essere migliorato quando si intende aumentare la resilienza di un sistema.

4.1 L'importanza dei software Gis in questo tipo di analisi

L'utilizzo dei software Gis è stato determinante nell'analisi dei danni attesi e di conseguenza della gradualità. Solitamente, la simulazione idraulica dell'inondazione viene effettuata con software ingegneristici di modellazione 2D della piena, come HEC-RAS, i quali richiedono però l'inserimento di molteplici dati geometrici relativi all'alveo e di una serie di parametri idraulici, quali la velocità del flusso, i dati di rugosità e le condizioni al contorno, che non sempre è possibile reperire. L'utilizzo di ArcMap ha consentito l'applicazione del modello anche in mancanza dei suddetti dati ed ha sostituito software di modellazione idraulica fornendo comunque risultati accettabili, seppure con un margine di errore più ampio. Di certo un utilizzo più maturo del software e una maggiore disponibilità di dati più dettagliati, migliorerebbe l'analisi e ridurrebbe il margine di errore, contribuendo così a diffondere un approccio di resilienza alla gestione del rischio di alluvioni, soprattutto a livello locale, dove è fondamentale rendere operativo il concetto.

Ringraziamenti

I ringraziamenti vanno all'Ing. Stefano Ferrari, relatore della Tesi di Laurea Magistrale affrontata in questo articolo, con il quale si è aperto un percorso di ricerca tutt'ora in corso.

Riferimenti

de Bruijn, K.M. (2005). Resilience and flood risk management. A systems approach applied to lowland rivers. DUP Science, Delft University Press.

Huizinga, H.J. (2007). Flood damage functions for EU member states. *Technical report*, HKV Consultants.

Farinosi, F., Carrera, L., Maziotis, A., Mysiak, J., Eboli, F. and Standardi, G. (2012). Policy-relevant assessment method of socio-economic impacts of floods: an Italian case study. *LIAISE Working paper*, project n.243826.

Frongia, S., Sechi, G. and Davison, M. (2016). Tangible and Intangible Flood damage evaluation. *E3S Web of Conferences*. 7. 05007. 10.1051/e3sconf/20160705007.

Khazai, B., Anhorn, J. and Burton, C.G. (2018). Resilience Performance Scorecard: Measuring urban disaster resilience at multiple levels of geography with case study application to Lalitpur, Nepal, *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 31. 604-616.

Miceli, R., Sotgiu, I. and Settanni, M. (2008). Disaster preparedness and perception of flood risk: A study in an alpine valley in Italy, *Journal of Hydrology*. 394. 118-133.

Russo, A. (2019). Un modello sistemico di valutazione della resilienza nella gestione del rischio inondazioni. Il caso del Comune di San Mauro Torinese. Tesi di Laurea Magistrale. Politecnico di Torino.

Triglia, A., Iadanza, C., Bussettini, M. and Lastoria, B. (2018). Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio. ISPRA. *Rapporti* 287/2018.

