

VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ DI SISTEMI TERRITORIALI COMPLESSI SOGGETTI A RISCHI DI ORIGINE NATURALE: IL CASO DELLA SOLLECITAZIONE IDROLOGICA IN VAL ROJA

R. Minciardi^{*°}, R. Sacile^{*°}, A.C.Taramasso^{*°}, E. Trasforini^{*°}, S. Traverso^{*}

^{*CIMA} – Centro di ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale, via Cadorna 7, 17100 Savona

^{°DIST} – Dipartimento di Informatica Sistemistica e Telematica, Università di Genova, via all’Opera Pia 13,
16145 Genova

eva.trasforini@unige.it

SOMMARIO

Uno degli obiettivi della pianificazione territoriale dovrebbe essere quello di definire e di valutare possibili strategie per mitigare gli effetti dei rischi di origine naturale sul territorio. Poiché si può riscontrare una certa mancanza di adeguati strumenti che possano essere di aiuto ai gestori del territorio come supporto alle loro decisioni, in questo lavoro si presenta un approccio definito *ad hoc* per valutare la vulnerabilità di un sistema territoriale complesso agli eventi naturali di tipo catastrofico. L’innovatività del lavoro è principalmente concentrata nel passaggio del concetto di vulnerabilità da caratteristica di un particolare elemento territoriale a caratteristica di un sistema nel suo complesso, nel quale gli elementi sono tra di loro funzionalmente legati, nonché nella formalizzazione basata sui grafi di influenza di una procedura per valutare in maniera adeguata tale vulnerabilità, che viene denominata “sistemica”. L’approccio può essere utilizzato per individuare le criticità del territorio soggetto a rischi, oppure per valutare l’opportunità di effettuare interventi (di tipo strutturale o gestionale) sul sistema territoriale. Al fine di sottolineare le potenzialità dell’approccio proposto, viene descritto un caso di studio specifico, relativo al caso di rischio da inondazione in Val Roja (Imperia).

1. INTRODUZIONE

Gli eventi estremi di origine naturale possono talvolta produrre effetti catastrofici sul territorio interessato. Tale tipo di fenomeni, oltre a provocare spesso perdite di vite umane, può danneggiare in maniera più o meno seria i cosiddetti “esposti vulnerabili” presenti sul territorio, come ad esempio edifici o infrastrutture, e provocare danni e disservizi – temporanei o permanenti – alle attività di servizio, economiche oppure produttive. E’ quindi evidente come uno dei principali obiettivi dei pianificatori dovrebbe essere quello di definire adeguate metodologie per mitigare gli effetti degli eventi estremi di origine naturale. A tale fine, è necessario predisporre strumenti e metodologie che possano essere di aiuto ai pianificatori nella fase decisionale, fornendo in maniera adeguata informazioni relative alle possibili conseguenze di un evento calamitoso sul territorio e all’effetto di eventuali interventi di mitigazione, siano essi di tipo strutturale o di tipo amministrativo-gestionale. Un tale tipo di strumento si deve basare su uno studio che richiede competenze di tipo specifico, relative sia al particolare rischio naturale considerato, sia agli elementi del sistema territoriale su cui esso può agire. Ciò nonostante, è importante cercare di definire un approccio comune all’analisi dei diversi rischi di origine naturale che possono interessare un territorio, in modo da fornire ai pianificatori uno strumento versatile ed in grado di essere utilizzato anche da chi non sia in possesso di specifiche conoscenze relative al particolare fenomeno considerato. Sebbene la necessità e la richiesta di strumenti di tale tipo sia molto alta, solo recentemente alcuni lavori di tipo scientifico hanno affrontato tali tematiche.

In generale, un certo numero di autori (si vedano ad esempio [1], [2] e [3]) ha sviluppato metodologie per la decisione in condizioni di incertezza in relazione a tematiche relative al rischio ambientale e naturale. Tali metodologie non sono però in grado di modellare le molteplici interconnessioni fisiche e funzionali che caratterizzano i sistemi territoriali. A questo proposito, va sottolineata l’importanza di rappresentare le diverse tipologie di sotto-sistemi che svolgono funzioni particolari e specializzate (ad esempio, insediamenti abitativi, centri di assistenza sanitaria, strutture per la protezione civile e del territorio, infrastrutture relative alla viabilità, alla distribuzione di energia, etc.), nonché le interconnessioni funzionali fra tali sotto-sistemi.

Tra i lavori in cui viene effettuato uno sforzo per modellare l’effetto dell’esistenza di connessioni funzionali tra i diversi elementi di un sistema territoriale soggetto a rischi naturali si può citare quello di Tamura *et al.* [4], che hanno proposto un approccio basato sulla definizione di un “valore di funzionalità in caso di rischio”. Lo scopo del lavoro è quello di sviluppare una metodologia per la definizione di strategie atte a mitigare gli effetti dei disastri di origine naturale. L’attenzione è focalizzata in maniera particolare sull’analisi di scenari di rischio caratterizzati da una bassa probabilità di accadimento, ma da un’alta

rilevanza degli effetti; questo è il caso, ad esempio, dei terremoti. E' stato definito un approccio di tipo multi-attributo, al fine di effettuare una valutazione comparativa di diverse possibilità di intervento, tenendo in considerazione non solo il danno totale atteso in relazione ad un particolare scenario, ma anche il numero di morti e di feriti gravi durante e dopo un evento di tale genere. E' stato dimostrato che l'approccio di Tamura *et al.*, nel caso in cui si vogliono analizzare le conseguenze di eventi caratterizzati da bassa probabilità di accadimento e grande rilevanza, è da ritenersi preferibile al più comune approccio basato sulla teoria dell'utilità attesa [5].

Alcuni degli esempi desumibili dalla letteratura e che si focalizzano sull'analisi delle conseguenze di eventi calamitosi sul territorio si basano sull'osservazione del fatto che un danno localizzato (ossia concentrato su un particolare elemento territoriale) può provocare ripercussioni sulla funzionalità del sistema territoriale nel suo complesso. Un esempio chiarificatore di tale affermazione potrebbe essere quello di un'infrastruttura stradale, la cui efficienza può essere messa in crisi dal danneggiamento di un singolo elemento infrastrutturale, come ad esempio un viadotto o uno svincolo. Tra questi approcci si può citare quello proposto da Ezell *et al.* [6] che mira all'analisi del rischio associato ad una perdita di funzionalità all'interno di un sistema infrastrutturale. Tale modello si basa su un approccio di tipo olistico ed è stato inizialmente studiato per essere applicato ad un sistema di trattamento e di fornitura d'acqua di un piccolo comune. L'approccio è stato chiamato IRAM (Infrastructure Risk Analysis Model) e sembra essere ben applicabile a quei sistemi, come i sistemi infrastrutturali, in cui sia possibile descrivere il rischio di inoperabilità tramite l'utilizzo di un albero ad eventi.

In un altro recente lavoro [7] è stato proposto un modello di input-output per la definizione del rischio associato alle infrastrutture basato sulla metodologia di Leontief (Premio Nobel in Economia nel 1973, [8]), in cui sono esplicitamente considerate le interconnessioni di tipo funzionale che intercorrono tra i singoli elementi dell'infrastruttura. Gli input al modello di rischio (la cui forma generale viene approssimata tramite un modello lineare) sono costituiti dalle perturbazioni di natura negativa che possono interessare il sistema infrastrutturale, mentre gli output sono rappresentati dal rischio di inoperatività dell'infrastruttura dovuto alle perturbazioni. In questo lavoro viene presentato anche un approccio per lo studio dell'evoluzione dinamica del rischio di inoperabilità, basato su una modellazione input-output alla Leontief. La caratteristica prettamente lineare di questo approccio lo rende ideale nel caso in cui la relazione tra magnitudo dell'evento ed effetti sull'intero sistema territoriale sono legati tra loro appunto da una relazione di tipo lineare.

Lo scopo principale di questo lavoro è quello di definire la struttura di un Sistema di Supporto alle Decisioni (SSD) che possa assistere i pianificatori e i *decision makers* nell'analisi delle conseguenze, all'interno di un sistema territoriale complesso, di un dato scenario legato ad uno specifico rischio naturale. In altre parole, il SSD ha lo scopo di valutare la risposta ad uno stress esterno (l'evento calamitoso di origine naturale) in termini di perdita di funzionalità del sistema territoriale nel suo complesso. L'obiettivo è quello di essere di supporto ai *decision makers*, in fase di pianificazione, per stabilire priorità di intervento e per fornire indicatori quali/quantitativi che siano di supporto per una corretta allocazione di risorse.

Ciascuno dei tre approcci precedentemente introdotti non sembra essere adatto all'analisi delle conseguenze di un evento naturale in generale, poiché essi o sono legati ad aspetti modellistici troppo specifici, oppure sono limitati a sistemi di dimensioni limitate. Per gli scopi di questo lavoro, è necessaria una metodologia più generale, in modo che l'utente finale possa essere facilmente coinvolto nel processo decisionale relativo ad un sistema territoriale esteso, senza che debba essere obbligatoriamente esperto in aspetti modellistici troppo specifici, relativi al particolare tipo di rischio considerato.

Alla luce di tali considerazioni, un approccio che sembra utilizzabile per definire la procedura che si sta cercando è quello relativo all'analisi decisionale bayesiana. In questo ambito, si possono individuare tre principali approcci che si basano su tale teoria, ovvero gli alberi decisionali, le *belief network* e i diagrammi di influenza. Ciascuno dei tre approcci utilizza i grafi per rappresentare situazioni in cui debbano essere prese delle decisioni. Negli alberi decisionali, si possono utilizzare due tipi di nodi, uno dei quali rappresenta le decisioni che devono essere prese e che sono quindi controllabili dal decisore, mentre l'altro è associato alla probabilità che un certo evento accada, in modo non controllabile dal decisore. L'idea di base è che entrambe le tipologie di nodi devono essere posizionati nell'ordine in cui le operazioni ad essi associate devono essere processate, e ogni insieme di uscite da un nodo definisce un nuovo ramo dell'albero [9]. Le *belief network* [10] invece usano i grafi per rappresentare una struttura probabilistica, in cui esiste una relazione diretta tra il modello basato su grafi ed una particolare forma di distribuzione probabilistica. Ciascun nodo è utilizzato per descrivere una variabile aleatoria, mentre ciascun arco (diretto) rappresenta un'influenza diretta o una dipendenza. Infine, un diagramma di influenza è un modello di rappresentazione della conoscenza che può essere visto a tre livelli gerarchici: topologico, funzionale e numerico. A livello topologico, un diagramma di influenza è una rappresentazione grafica delle relazioni tra le variabili coinvolte nel problema che si sta considerando. Esso rivela graficamente il flusso di informazioni, le influenze esistenti e la struttura globale del sistema considerato. I nodi di un diagramma di influenza rappresentano le variabili del sistema che deve

essere modellato, mentre gli archi (diretti) identificano le influenze condizionali tra i nodi. Nella costruzione di un diagramma di influenza devono essere considerati tre tipi di elementi: le variabili di stato (rappresentate da nodi circolari), variabili decisionali o di controllo (rappresentate da nodi rettangolari) e valori (rappresentati da nodi a forma di diamante). Si dice che una variabile x influenza la variabile di stato y se l'informazione conosciuta in relazione a x condiziona y . Questo tipo di influenza implica l'esistenza, nel diagramma di influenza, dell'arco diretto (x,y) . Nella gestione dei sistemi ambientali, il cui comportamento è caratterizzato da una forte incertezza, riscontrabile anche nella formalizzazione di problemi decisionali di pianificazione delle risorse, molti studi hanno adottato un approccio modellistico basato sulla teoria dei diagrammi di influenza (si vedano [9] e [11]). Per una trattazione più dettagliata sui diagrammi di influenza si vedano [12], [13] e [14].

Non si è ritenuto necessario inserire aspetti di tipo probabilistico in questo lavoro, quindi è stata individuata come struttura concettuale in grado di soddisfare le esigenze relative all'analisi delle conseguenze di eventi naturali calamitosi su un sistema territoriale quella relativa al livello topologico dei diagrammi di influenza, trascurando il contenuto informativo legato agli altri due livelli. Per evitare qualsiasi eventuale fraintendimento, nel seguito si eviterà qualsiasi riferimento specifico ai diagrammi di influenza, mentre verrà comunemente utilizzato il termine "grafi".

2. L'APPROCCIO PROPOSTO

Lo scopo che ci si prefigge è quello di definire uno strumento che sia in grado di coinvolgere l'utente finale nel processo decisionale relativo ad un sistema territoriale di medie/grandi dimensioni nel caso in cui questo sia soggetto a rischi di origine naturale. Tale strumento deve essere in grado di fornire informazioni di tipo qualitativo e quantitativo in relazione alla funzionalità del sistema territoriale (e degli elementi che lo compongono) conseguente ad un plausibile scenario di disastro. Poiché tale strumento fornisce in qualche modo una misura del legame tra magnitudo di un evento su un predefinito sistema territoriale ed entità delle conseguenze (dirette ed indirette) sul sistema stesso, si dice che lo strumento deve essere in grado di fornire i risultati di un'analisi di "vulnerabilità sistemica".

Tale concetto può essere correttamente formalizzato solo dopo aver introdotto le definizioni, comunemente adottate in letteratura, di "vulnerabilità fisica" e "vulnerabilità funzionale".

Con il primo termine si intende la misura della propensione di un elemento a subire danni nel caso in cui esso sia soggetto a pressioni esterne (nello specifico, i fenomeni di origine naturale). Con il termine "vulnerabilità funzionale" si intende invece la misura della propensione di un elemento a subire perdite di funzionalità in relazione a pressioni esterne. Risulta quindi evidente che le due tipologie di vulnerabilità, per certi elementi per certi scenari, possono alquanto differire.

E' a questo punto possibile introdurre il concetto di vulnerabilità sistemica, che amplia quello di vulnerabilità funzionale tramite l'esplicita considerazione non solo delle perdite di funzionalità di un elemento dovute all'azione dello stress esterno sulla sua struttura fisica, ma anche dei danni funzionali dovuti al fatto che tale elemento è funzionalmente collegato ad altri del sistema territoriale, ovvero è una misura della dipendenza di un elemento dagli altri elementi facenti parte del medesimo sistema territoriale. Naturalmente, se l'elemento considerato è autonomo e completamente isolato dal resto del sistema, esso avrà vulnerabilità sistemica nulla.

Si noti che la vulnerabilità fisica e funzionale, sebbene possano alquanto differire tra loro per certi elementi e per certi scenari, sono entrambe dipendenti dalla particolare tipologia di rischio naturale che si considera. Al contrario, gli effetti della vulnerabilità sistemica su un sistema territoriale sono generalmente slegati dalla particolare tipologia di rischio cui si fa riferimento, poiché essi sono legati al livello di interconnessione tra i diversi elementi che compongono il sistema.

Prendendo spunto dalle definizioni delle varie tipologie di vulnerabilità precedentemente introdotte, non si può dare una valutazione complessiva della funzionalità di un sistema territoriale senza tenere in debito conto le relazioni intercorrenti tra i suoi sottoinsiemi; la funzionalità complessiva del sistema, infatti, può diminuire sia a causa delle sollecitazioni dirette sui singoli componenti del sistema territoriale, sia a causa delle perdite di funzionalità indotte dai legami esistenti tra i diversi sottoinsiemi. Tale affermazione diventa evidente se si prende in considerazione, ad esempio, un ospedale collegato ai centri urbani limitrofi tramite un'unica strada: se per qualche motivo (frane, inondazioni, etc.) tale strada non è transitabile, l'ospedale perde la propria funzionalità anche se non ha subito nessun danno diretto.

Risulta quindi opportuno analizzare la vulnerabilità di un sistema territoriale non solo in termini di studio dei singoli componenti, ma anche delle relazioni tra loro intercorrenti. A questo scopo si propone una procedura basata sulla modellistica del territorio come un grafo orientato $G(E,A)$, dove E è l'insieme dei nodi e A è l'insieme degli archi.

I nodi appartenenti all'insieme E rappresentano tutti gli elementi territoriali rilevanti per il sistema territoriale; il danneggiamento o la mancata funzionalità di uno di questi elementi può influenzare in maniera sensibile la corretta funzionalità del sistema territoriale nel suo complesso. Tali nodi possono rappresentare elementi territoriali puntuali (come ospedali o caserme), lineari (come tratti di infrastrutture stradali) o areali (come quartieri residenziali o siti industriali).

Gli archi appartenenti all'insieme A, invece, rappresentano le influenze che intercorrono tra le funzionalità dei diversi elementi territoriali, ovvero tra i diversi nodi. In particolare, si dice che un elemento "influenza" un altro elemento quando la rottura o la diminuzione di efficienza del primo influisce in modo negativo sulla funzionalità del secondo.

Al fine di descrivere l'approccio proposto per la valutazione della vulnerabilità sistemica, è necessario introdurre una notazione specifica. In particolare, per ogni nodo i appartenente all'insieme E ($i=1, \dots, N$, dove N è il numero di elementi territoriali considerati) vengono introdotte le seguenti quantità:

$\bar{\xi}_i^k$	vettore di sollecitazione esterna relativa al rischio naturale di tipo k agente sull' i -esimo elemento territoriale;
y_i	livello di integrità fisica dell' i -esimo elemento territoriale;
d_i	livello di danno fisico dell' i -esimo elemento territoriale;
$f_i^k(\cdot)$	funzione di vulnerabilità dell' elemento i -esimo rispetto al rischio naturale di tipo k ;
x_i^0	livello di funzionalità intrinseca, ovvero il livello di integrità funzionale dell'elemento i valutata esclusivamente sulla base della sua integrità fisica;
x_i	livello di integrità funzionale (considerando anche il contributo dovuto alla vulnerabilità sistemica) dell'elemento i ;
$\rho_i(\cdot)$	funzione di funzionalità intrinseca dell'elemento i ;
$\varphi_i(\cdot)$	funzione di vulnerabilità sistemica dell'elemento i -esimo;
$P(i)$	insieme dei nodi predecessori del nodo i , ovvero l'insieme dei nodi j per cui esiste un arco diretto (j,i) .

Inoltre, per ogni coppia di nodi j e i per cui esiste un arco orientato (j,i) appartenente all'insieme A, deve essere introdotta la seguente quantità:

$w_{ij}(\cdot)$	funzione di influenza, che esprime l'influenza esercitata dal nodo j sul nodo i .
-----------------	---

Le componenti del vettore $\bar{\xi}_i^k$ corrispondono alle quantità fisiche che caratterizzano, per ogni elemento i , l'intensità dell'evento k . Tali quantità possono essere modellate sia come un insieme di variabili aleatorie congiunte, oppure come variabili deterministiche nel caso in cui si stia effettuando un'analisi di scenario. Per esempio, nel caso di rischio da inondazione, tali componenti potrebbero ragionevolmente corrispondere al tirante idraulico, alla velocità dell'onda di piena e alla durata dell'evento di inondazione.

Il livello di integrità fisica y_i del nodo i è definito tramite l'utilizzo di una variabile che descrive la condizione di integrità fisica dell'elemento associato a tale nodo (ad esempio, l'integrità di un ponte dopo un terremoto). Si assume che tale variabile possa assumere valori reali nell'intervallo tra 0 e 1, dove 1 indica la completa integrità fisica, mentre 0 corrisponde la completa distruzione dell'elemento considerato. In alternativa, il livello di danno fisico d_i è definito come il complemento ad 1 del livello di integrità fisica.

Il livello di integrità fisica è legato al vettore di pressione esterna $\bar{\xi}_i^k$ tramite la funzione di vulnerabilità $f_i^k(\cdot)$, che è definita per ciascuna tipologia k di rischio naturale e per ciascun elemento i .

$$y_i = f_i^k(\bar{\xi}_i^k) \quad (1)$$

Questa funzione fornisce una valutazione quantitativa dell'intensità del danno che una data pressione, legata alla tipologia di rischio k , può indurre sull'elemento i . Quando la sollecitazione esterna è espressa tramite una quantità scalare, la funzione di vulnerabilità può essere rappresentata tramite una funzione monotona non crescente con comportamento asintotico, poiché l'integrità fisica dell'elemento danneggiato non può decrescere al di sotto di un certo valore.

La variabile che esprime il livello di funzionalità intrinseca di un elemento x_i^0 può assumere valori compresi nell'intervallo continuo tra 0 e 1. Analogamente a quanto visto per il livello di integrità fisica, 1

indica la completa integrità funzionale intrinseca, mentre 0 indica che l'elemento considerato è fuori uso. Il livello di funzionalità intrinseca è strettamente dipendente dal livello di integrità fisica dell'elemento considerato, ma non tiene in considerazione l'eventuale influenza degli altri elementi territoriali, come è indicato dalla relazione

$$x_i^0 = \rho_i(y_i) \quad (2)$$

Il livello di funzionalità x_i descrive le condizioni di integrità funzionale dell'elemento territoriale associato al nodo i ; tale condizione spesso non coincide con il livello di funzionalità intrinseca. Ad esempio, un ospedale potrebbe non essere stato direttamente danneggiato da un sisma, e quindi essere caratterizzato da funzionalità intrinseca pari a 1, ma potrebbe essere non operativo poiché è stata danneggiata l'unica via che permette l'accesso alla struttura ospedaliera. Come nel caso del livello di funzionalità intrinseca, anche la variabile che esprime il livello di funzionalità può assumere valori reali compresi nell'intervallo tra 0 e 1, dove 1 indica la completa integrità funzionale, mentre 0 corrisponde ad uno stato di totale inoperatività.

E' ragionevole assumere che la variabile x_i sia dipendente dal livello di funzionalità intrinseca dell'elemento considerato x_i^0 e dal livello di funzionalità degli elementi che influenzano la funzionalità di i , ovvero quegli elementi che sono rappresentati dai nodi facenti parte dell'insieme $P(i)$ dei predecessori del nodo i . Questa assunzione può essere rappresentata tramite la relazione

$$x_i = \varphi_i(x_i^0, x_j, \forall j \in P(i)) \quad (3)$$

Una definizione appropriata della funzione di vulnerabilità sistemica φ_i è, in generale, abbastanza difficile, poiché è necessario conoscere a fondo le relazioni che intercorrono tra i diversi elementi coinvolti. Quando comunque non è possibile effettuare un'analisi estremamente dettagliata, si può adottare il seguente approccio. Si può assumere che, per ottenere un valore di funzionalità massimo (ossia pari ad 1), sia necessario sia che gli elementi appartenenti all'insieme $P(i)$ siano pienamente funzionali, sia che la funzionalità intrinseca x_i^0 dell'elemento i sia massima. Per esprimere questo tipo di dipendenza può essere utilizzata, per esempio, la funzione di "minimo" introducendo la seguente espressione per esprimere la (3)

$$x_i = \min(x_i^0, w_{ij}(x_j), \forall j \in P(i)) \quad (4)$$

dove la funzione esprime il livello di influenza dell'elemento j sul livello di funzionalità dell'elemento i e deve soddisfare le seguenti condizioni:

- in caso di forte influenza dell'elemento j sull'elemento i , ad un piccolo decremento del livello di funzionalità dell'elemento j deve corrispondere un considerevole decremento del livello di funzionalità dell'elemento i ;
- in caso di debole influenza dell'elemento j sull'elemento i , ad un piccolo decremento del livello di funzionalità dell'elemento j deve corrispondere un piccolo decremento del livello di funzionalità dell'elemento i .

Ovviamente può essere considerata tutta una serie di strutture di dipendenza intermedie tra quelle precedentemente introdotte, in base alla particolare situazione che si sta analizzando ed al livello di dettaglio che si sta utilizzando per la formalizzazione del modello. La corretta identificazione della struttura matematica da utilizzare per rappresentare le varie dipendenze tra gli elementi è uno tra i passi più delicati nella procedura proposta. Come ipotesi semplificativa si può assumere che la funzione $w_{ij}(x_j)$ possa assumere lo stesso tipo di andamento per ciascuna dipendenza, espresso tramite l'utilizzo di una funzione monotona non decrescente, caratterizzata da dominio e co-dominio appartenenti all'intervallo $[0,1]$. In questo lavoro si è scelto di rappresentare l'influenza della funzionalità dell'elemento j sulla funzionalità dell'elemento i tramite la seguente espressione

$$w_{ij}(x_j) = (1 - 0.1\alpha_{ij}) \frac{(1 - e^{-\alpha_{ij}x_j^2})}{(1 - e^{-\alpha_{ij}})} + 0.1\alpha_{ij} \quad (5)$$

dove α_{ij} è un parametro che caratterizza l'arco; si noti che quando il valore di α_{ij} cresce, il livello di influenza della funzionalità dell'elemento j sulla funzionalità dell'elemento i decresce e viceversa.

Un'espressione analoga alla (5) può essere utilizzata anche per esprimere la funzione di funzionalità intrinseca $\rho_i(\cdot)$

$$x_i^0 = (1 - 0.1\tilde{\alpha}_i) \frac{(1 - e^{-\tilde{\alpha}_i y_i^2})}{(1 - e^{-\tilde{\alpha}_i})} + 0.1\tilde{\alpha}_i \quad (6)$$

dove $\tilde{\alpha}_i$ è un parametro che esprime l'influenza del livello di integrità fisica dell'elemento i , ovvero y_i , sulla sua funzionalità intrinseca, ovvero x_i^0 .

Può essere inoltre introdotto un indice globale I di funzionalità del sistema, definito come la media su tutti gli elementi considerati dei valori di integrità funzionale, e che può essere espresso come

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (7)$$

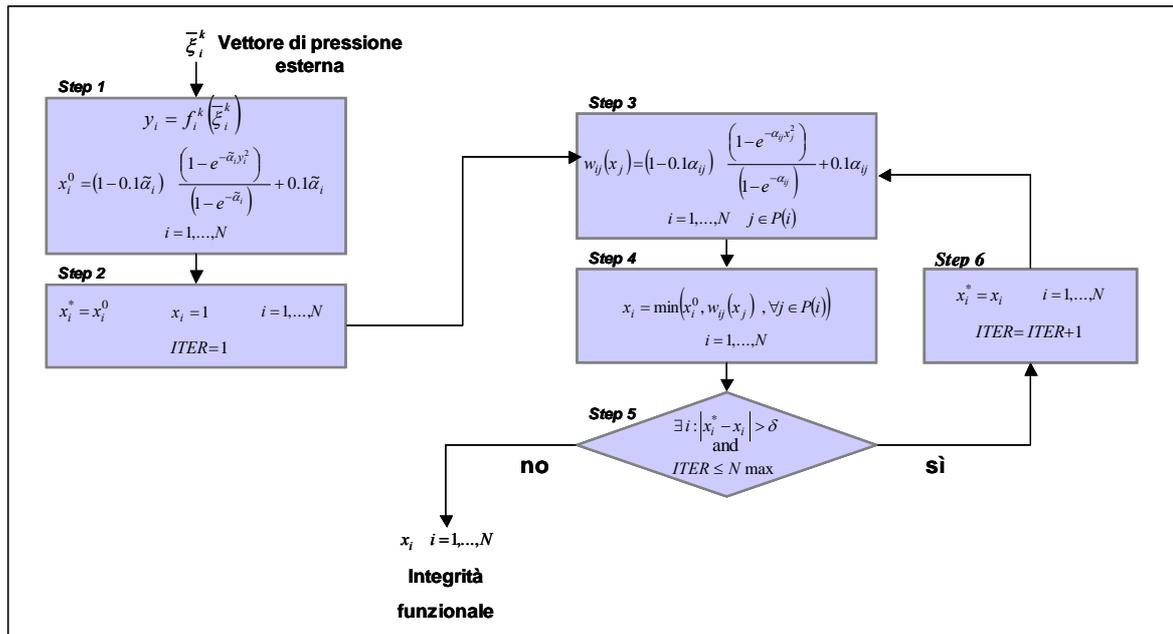


Figura 1. Diagramma di flusso della procedura di analisi di vulnerabilità sistemica.

Il sistema di equazioni espresso dalle (1), (4), (5) e (6) può essere risolto tramite l'utilizzo di una procedura iterativa (si veda il diagramma di flusso in figura 1) e che può essere così schematizzata:

- si valutano i valori di integrità fisica e funzionalità intrinseca di ogni elemento tramite l'utilizzo, rispettivamente, delle equazioni (1) e (6);
- si introduce una variabile temporanea x_i^* per ogni elemento considerato, in modo da tenere memoria dei valori di funzionalità che vengono calcolati ad ogni iterazione della procedura; tale variabile viene inizializzata al valore di funzionalità intrinseca x_i^0 del corrispondente elemento territoriale; la variabile che esprime la funzionalità di un elemento, ovvero x_i , viene invece inizializzata ad 1;
- vengono valutate le funzioni di influenza $w_{ij}(\cdot)$ tramite l'utilizzo dell'equazione (5) e utilizzando, come valore di funzionalità di ogni nodo j , quello che è stato memorizzato nella variabile temporanea x_j^* ; in questo modo, ad ogni iterazione della procedura viene valutata una nuova serie di funzioni di influenza, corrispondente ai valori correnti di funzionalità;
- viene valutata la funzionalità x_i per ogni nodo i in relazione alla corrente iterazione tramite l'utilizzo dell'equazione (5);
- la procedura si interrompe quando la differenza tra i valori memorizzati nella variabile temporanea x_i^* e la variabile x_i per ogni elemento i è minore di una prefissata soglia δ oppure, in alternativa, quando è stato effettuato un numero fissato N_{max} di iterazioni della procedura.

Differenti e molteplici sono gli utilizzi che si possono fare delle informazioni deducibili tramite l'approccio precedentemente proposto.

Lo scopo principale della procedura è quello di essere di supporto ai *decision makers* nell'analisi delle conseguenze di uno scenario di disastro naturale su un sistema territoriale complesso, al fine di definire le priorità di intervento. In generale, gli elementi cui si dovrebbe dare priorità di intervento sono quelli caratterizzati dai minori valori di integrità funzionale x_i . Tuttavia, la procedura proposta permette anche di intervenire in maniera mirata su quegli elementi che maggiormente sono soggetti agli effetti della vulnerabilità sistemica. A tale fine, si introduce il parametro Δx_i , definito come la differenza tra il livello della funzionalità intrinseca x_i^0 di un elemento i e il livello di funzionalità x_i , corrispondenti ad un dato scenario. Un alto valore del parametro Δx_i è indice di una forte influenza degli elementi appartenenti all'insieme dei predecessori dell'elemento i $P(i)$ sull'elemento stesso. In questo caso, gli interventi atti a migliorare la funzionalità dell'elemento i possono seguire due strade distinte:

- migliorare la funzionalità di quegli elementi che fanno parte dell'insieme dei predecessori $P(i)$ e che maggiormente influenzano i ;
- effettuare interventi (ad esempio, costruendo nuove infrastrutture) al fine di diminuire il grado di influenza degli elementi dell'insieme $P(i)$ sull'elemento considerato.

Un'altra possibile applicazione della procedura proposta è legata alla fase di gestione pre-operativa delle emergenze, nel momento in cui deve essere effettuata l'allocazione preventiva delle risorse atte a fronteggiare l'emergenza. Infatti, una efficiente localizzazione delle risorse richiede che gli elementi territoriali maggiormente esposti siano facilmente e velocemente raggiungibili dai mezzi di soccorso. Quindi gli elementi territoriali possono essere classificati e ordinati in funzione della perdita di funzionalità attesa (sia intrinseca, sia sistemica), al fine di ottimizzare la gestione delle risorse di emergenza.

Infine, la procedura di valutazione della vulnerabilità sistemica è promettente per quanto riguarda la formazione degli operatori e dei *decision makers* nell'individuazione delle criticità nascoste in un sistema territoriale, dovute proprio all'esistenza di legami funzionali tra i diversi elementi.

3. APPLICAZIONE AD UN CASO DI STUDIO: IL RISCHIO DA INONDAZIONE IN VAL ROJA

La precedente procedura è stata applicata al caso di studio reale del rischio da inondazione nel bacino della Val Roja, situata nella zona transfrontaliera tra la Liguria e la regione PACA in Francia.

Il lavoro necessario per effettuare la valutazione di vulnerabilità sistemica è di carattere interdisciplinare, poiché sono richieste le competenze di esperti di diversi settori.

Il lavoro complessivo può essere sintetizzato in tre fasi, di cui la prima è relativa alla caratterizzazione del sistema territoriale, la seconda sull'analisi delle conseguenze dirette di un evento di scenario sul sistema in esame, mentre la terza è focalizzata sulla vera e propria analisi di vulnerabilità sistemica. Nelle prossime sezioni verranno descritte più in dettaglio le attività che caratterizzano ciascuna delle tre fasi.

3.1 Caratterizzazione del sistema territoriale

Il bacino della Val Roja è situato nei pressi della costa nord-occidentale italiana, al confine con la Francia. Il bacino è caratterizzato da un'area di circa 660 km² e da una lunghezza di circa 59 km. L'area del bacino più prossima alla zona costiera è quella caratterizzata da una maggiore antropizzazione (qui, infatti, sono concentrati i principali centri urbani, le infrastrutture di trasporto, i servizi medici e di pubblica sicurezza), mentre le zone a monte sono caratterizzate da un'urbanizzazione molto più sparsa.

Il grafo utilizzato per rappresentare il sistema territoriale è composto da 98 elementi di importanza rilevante. In particolare, sono stati individuati 44 elementi di tipo areale, 30 elementi di tipo lineare e 24 elementi di tipo puntuale. All'interno del primo gruppo sono presenti elementi che corrispondono ai centri urbani isolati, oppure a quartieri della zona urbana principale, ovvero Ventimiglia. Gli elementi lineari, invece, corrispondono a tratti delle infrastrutture di trasporto a livello nazionale, regionale o urbano. Gli elementi di tipo puntuale, infine, corrispondono a strutture mediche, servizi di pubblica sicurezza ed a particolari elementi dell'infrastruttura di trasporto (ad esempio, ponti).

E' stato necessario definire una struttura relazionale tra gli elementi precedentemente individuati. Innanzi tutto, per ciascuna coppia di elementi, è stato deciso se esiste una relazione di influenza tra il primo e il secondo e viceversa, individuando più di 2500 coppie di elementi caratterizzate da un legame di influenza non trascurabile. Dunque è stato assegnato a ciascuna relazione (ovvero, a ciascun arco del grafo) un livello di importanza, scegliendo sulla base di quattro possibili classi (debole, medio-debole, medio-forte, forte). Queste quattro classi sono state utilizzate per assegnare i valori ai parametri α_{ij} che devono essere inseriti all'interno dell'equazione (5). In particolare, all'influenza debole è stato assegnato un valore di $\alpha_{ij}=8$, per il livello medio-debole si è assegnato $\alpha_{ij}=7$, per il livello medio-forte si è assegnato $\alpha_{ij}=5$, ed infine al livello forte è stato assegnato un valore di $\alpha_{ij}=2$. In figura 2 sono riportati gli andamenti dell'equazione (5) nei casi

particolari di influenza forte e debole.

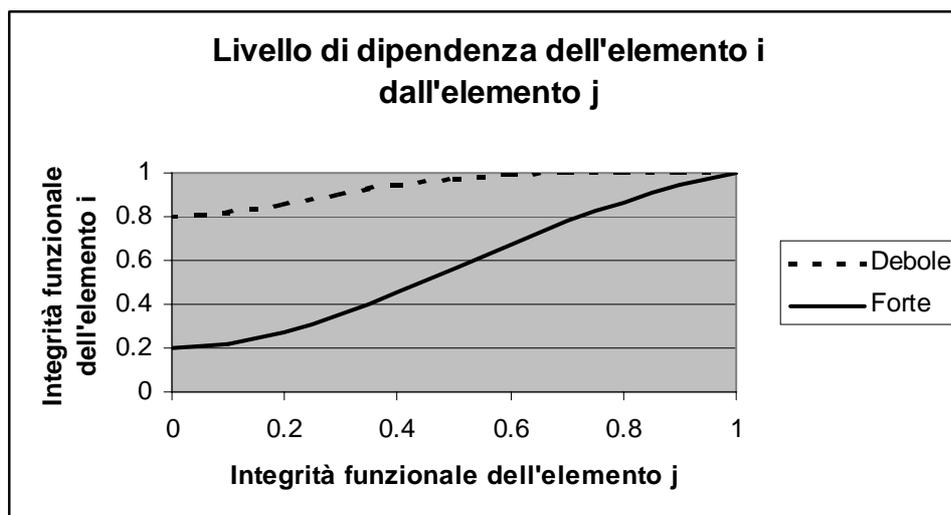


Figura 2. Andamento delle funzioni che legano l'integrità funzionale dell'elemento *i* all'integrità funzionale dell'elemento *j* nel caso in cui tale dipendenza sia debole oppure forte.

E' stato necessario caratterizzare il sistema anche in relazione ai particolari scenari di danno scelti. Sono stati scelti i periodi di ritorno tipici della pianificazione di bacino, ovvero quelli relativi a T=50 e T=200 anni; inoltre, si è scelto di introdurre uno scenario anche in relazione al periodo di ritorno T=100 anni. Sono state individuate le aree inondabili relative a questi tre diversi periodi di ritorno e tale informazione è stata sovrapposta alla mappa relativa alla localizzazione degli elementi del grafo considerato, individuando quegli elementi che sono direttamente coinvolti (per ciascun periodo di ritorno) nel possibile evento catastrofico.

3.2 Valutazione dell'integrità fisica e della funzionalità intrinseca degli elementi territoriali strategici

In questa fase sono stati considerati esclusivamente gli elementi che ricadono in una delle tre aree inondabili considerate. Per ciascuno di tali elementi è stato necessario effettuare un'analisi di dettaglio (anche tramite analisi *in situ*), in modo da raccogliere tutte le informazioni importanti in merito alla caratterizzazione fisica e funzionale dell'elemento. In seguito è stato necessario definire l'entità della pressione esterna su ogni elemento. Questa operazione è stata effettuata tramite l'utilizzo del modello "U-flood" [15], che è un modello di propagazione in area urbana e che ha permesso di conoscere, per ciascun elemento e per ciascun periodo di ritorno considerato, il tirante idraulico e la velocità dell'onda di piena, considerati entrambi al loro valore di picco.

E' stato quindi necessario valutare il livello di funzionalità intrinseca. Per ciascuno dei gruppi (areali, lineari, puntuali) di elementi considerati, è stata introdotta *ad hoc* una scala di valutazione, da cui è possibile desumere la funzionalità intrinseca di un elemento sulla base di considerazioni relative alla magnitudo dell'evento e al grado di raggiungibilità dell'elemento stesso. Tale scala sostituisce le equazioni (1) e (6), poiché tramite essa è possibile ottenere la funzionalità intrinseca di un elemento senza dover esplicitare il valore del livello di integrità fisica dell'elemento stesso. Uno stralcio di tale scala è riportato in tabella 1.

$0.1 \leq x_i < 0.3$	Completa Inagibilità
Puntuali	si intende l'impossibilità di accedere alla struttura anche per i mezzi di soccorso, cosicché sia impossibilitata ogni eventuale attività al suo interno
Lineari	si intende che la l'elemento lineare non possa svolgere la sua funzione di collegamento; le attività che insistono su di esso risultano compromesse e subiscono notevoli danni
Areali	si intende che l'area non possa essere in alcun modo raggiunta, o attraversata, neanche da mezzi di soccorso e che l'entità presenti un'assoluta impossibilità a svolgere le sue funzioni

Tabella 1. Stralcio della scala di valutazione della funzionalità intrinseca di un elemento sulla base di considerazioni relative alla magnitudo dell'evento e al grado di raggiungibilità dell'elemento stesso.

3.3 Analisi di vulnerabilità sistemica

Per ciascuna delle tre diverse analisi che sono state effettuate (ovvero, una per ciascuno dei periodi di ritorno considerati) i dati di input al sistema sono costituiti dall'insieme dei valori di funzionalità intrinseca dei diversi elementi territoriali. Si indicherà nel seguito con x_i^T , x_i^{OT} e I^T rispettivamente il livello di funzionalità dell'elemento i , il livello di funzionalità intrinseca dell'elemento i e l'indice globale di funzionalità corrispondenti al periodo di ritorno T .

Scenario 1: analisi per $T=50$ anni

In questo caso, solo 4 elementi territoriali risultano direttamente coinvolti nell'evento calamitoso, di cui 3 sono di tipo puntuale e uno di tipo lineare. Ciò nonostante, più del 42% degli elementi territoriali considerati mostra una perdita funzionale non trascurabile (intendendo con non trascurabile una perdita di funzionalità di almeno il 10%).

L'elemento che mostra il valore di funzionalità minimo è un campeggio posto sulla riva del fiume Roja; esso sarebbe infatti completamente inondato, assumendo quindi valori nulli sia di funzionalità, sia di funzionalità intrinseca.

Gli elementi che invece sono caratterizzati dal maggior decremento di funzionalità (ovvero la più grande differenza del valore $x_i^{OT}-x_i^T$) sono quelli corrispondenti ai tratti di strada a monte del ponte principale sul Roja. Tale decremento è dovuto ad un basso valore di funzionalità del ponte stesso, esso stesso non dovuto ad una perdita di funzionalità intrinseca, quanto piuttosto ad una perdita di funzionalità dei tratti stradali a valle del ponte.

In questo scenario l'indice globale di funzionalità assume valori pari a $I^{50}=0.82$.

Scenario 2: analisi per $T=100$ anni

Poiché le aree inondabili per $T=50$ e $T=100$ anni coincidono (sebbene gli eventi siano caratterizzati da portate di piena differenti, quindi sono differenti anche gli effetti della propagazione in area urbana), gli elementi territoriali direttamente coinvolti nell'evento sono gli stessi dello Scenario 1. Tuttavia, tali elementi sono caratterizzati da valori di funzionalità intrinseca differenti da quelli dello scenario precedente, specialmente per quanto riguarda il ponte sul Roja. In questo caso, circa il 53% degli elementi territoriali considerati è caratterizzato da una perdita di funzionalità non trascurabile.

Le considerazioni relative all'elemento che presenta il valore di funzionalità minimo e agli elementi caratterizzati dal massimo decremento di funzionalità sono analoghe a quelle descritte per $T=50$ anni.

In questo scenario l'indice globale di perdita di funzionalità assume valori pari a $I^{100}=0.74$.

Scenario 3: analisi per $T=200$ anni

In questo scenario, quasi tutta la rete stradale è direttamente o indirettamente coinvolta nell'evento catastrofico: più del 63% dei tratti stradali, infatti, è caratterizzato da un decremento funzionale. Questa indicazione è molto rilevante, in quanto la rete stradale è un elemento fondamentale durante le fasi di gestione delle emergenze.

Le considerazioni relative all'elemento che presenta il valore di funzionalità minimo e agli elementi caratterizzati dal massimo decremento di funzionalità sono analoghe a quelle descritte per $T=50$ e per $T=100$ anni. Infine, più del 60% degli elementi territoriali considerati è caratterizzato da una perdita di funzionalità non trascurabile.

L'indice globale di funzionalità è $I^{200}=0.62$.

3.4 Analisi di sensitività della procedura di analisi di vulnerabilità sistemica

La procedura di analisi della vulnerabilità sistemica è stata utilizzata anche per individuare l'elemento (o gli elementi) che, in relazione al particolare scenario considerato, maggiormente influenza la funzionalità del sistema territoriale. A tal fine, per ciascuno scenario sono state effettuate numerose analisi di sensitività, focalizzando di volta in volta l'attenzione su uno degli elementi territoriali direttamente coinvolti nell'evento calamitoso. Partendo da uno specifico scenario, ciascuna analisi è stata sviluppata inserendo come dati di input i valori di funzionalità intrinseca caratteristici dello scenario, ma variando (di una percentuale prefissata) di volta in volta il valore di funzionalità intrinseca di un solo elemento, e si è calcolato il valore di funzionalità globale I associato a ciascuna di queste analisi. Si è quindi osservato in corrispondenza dell'incremento del valore di x_i^0 di quale elemento il valore I variasse maggiormente, individuando così

l'elemento che maggiormente influisce sulla funzionalità complessiva del sistema. In ciascuno dei tre scenari considerati è risultato che l'elemento maggiormente condizionante è il ponte carrabile sul fiume Roja.

E' stato inoltre effettuato un ulteriore test sulla affidabilità dei risultati ottenuti dall'applicazione della procedura. Poiché uno dei passi più critici della procedura è la scelta dei valori da attribuire ai parametri α_{ij} , si è deciso di valutare la stabilità dei risultati al variare della scelta di questi parametri, partendo dalla considerazione che se una piccola variazione nella scelta dei parametri provoca grandi cambiamenti nei risultati della procedura, tali risultati non possono essere considerati affidabili. Si sono quindi effettuati quattro gruppi di analisi, ciascuno relativo ad un particolare livello di influenza (debole, medio-debole, medio-forte, forte). In ciascun gruppo di analisi, il valore del parametro α_{ij} relativo al particolare livello considerato è stato incrementato del 10% rispetto al valore assunto nello scenario di riferimento e sono stati valutati due aspetti:

- la variazione dell'indice globale di funzionalità I ;
- l'elemento territoriale che maggiormente influisce sulla funzionalità del sistema territoriale, valutato in maniera analoga a quanto descritto precedentemente.

I risultati sono stati molto incoraggianti per entrambi gli aspetti analizzati. Infatti, la variazione dell'indice globale di funzionalità non è mai stata superiore al 3% e il ponte carrabile sul fiume Roja è risultato essere sempre l'elemento che maggiormente influenza la funzionalità del sistema nel suo complesso. In figura 3 è riportata una rappresentazione grafica dei risultati ottenuti per lo scenario corrispondente a $T=200$ anni in relazione alla variazione della funzionalità intrinseca di alcuni degli elementi territoriali considerati, e in relazione all'incremento del valore assegnato ai parametri α_{ij} , e si può infatti notare che i valori di I^{200} relativi al ponte carrabile (cerchiato in figura) sono sempre caratterizzati da un valore maggiore rispetto a quelli assunti in corrispondenza degli altri elementi territoriali. Si può quindi affermare che il sistema considerato e la modellazione adottata per descriverlo siano caratterizzati da una stabilità accettabile. Inoltre, i risultati risultano incoraggianti, anche sulla base del giudizio di alcuni esperti del settore, anche dal punto di vista della plausibilità.

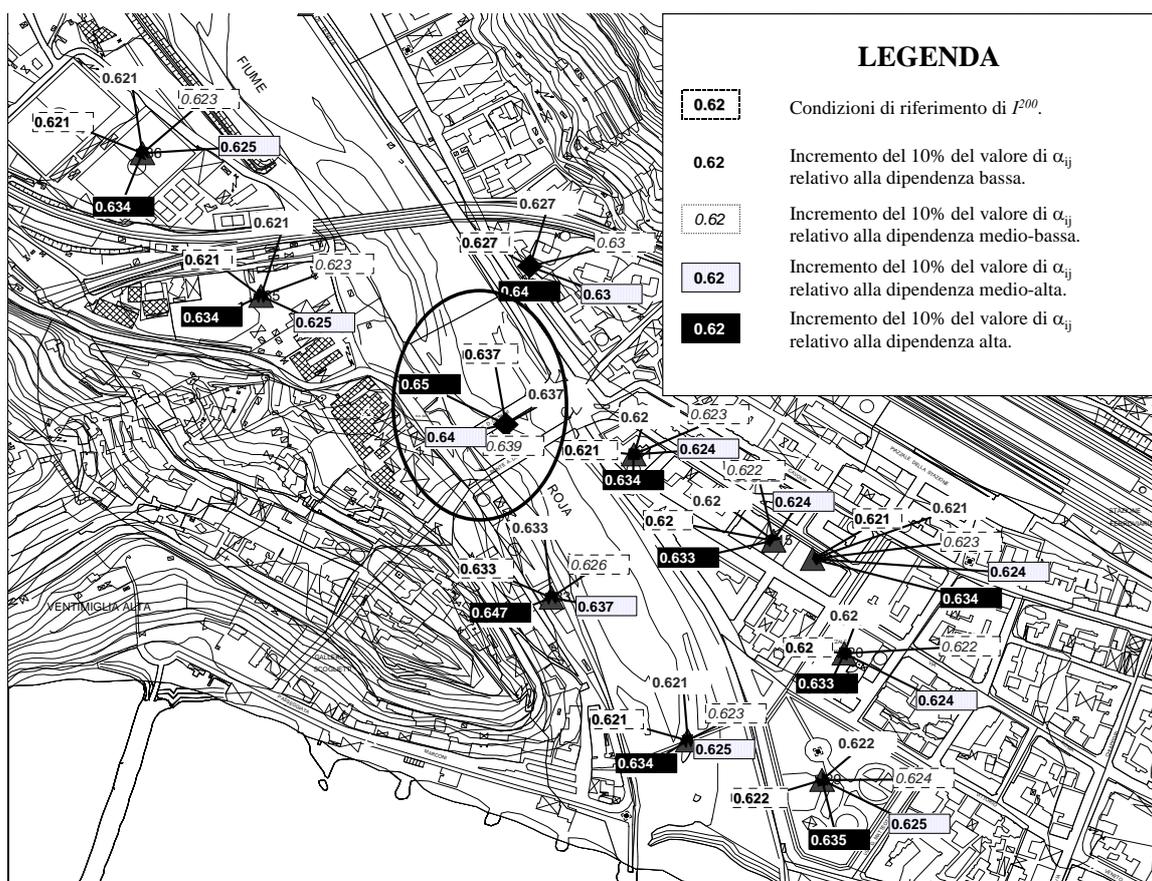


Figura 3. Rappresentazione dei risultati dell'analisi di sensitività. In corrispondenza di ciascun elemento territoriale è indicato il valore dell'indice I^{200} ottenuto incrementando del 10% la funzionalità residua dell'elemento stesso nelle condizioni di riferimento e incrementando, di volta in volta, il valore assegnato al parametro α_{ij} per ciascuna delle quattro classi di dipendenza tra elementi.

4. CONCLUSIONI

È stato introdotto un approccio per la valutazione delle conseguenze di eventi catastrofici di origine naturale, formalizzato tramite l'utilizzo di un modello del territorio basato sulla teoria dei grafi e tramite l'introduzione di una procedura per la valutazione della vulnerabilità sistemica.

L'elemento di maggiore innovatività del lavoro consiste nel passaggio di scala associato al concetto di vulnerabilità, che non viene più considerata semplicemente come la caratteristica di un singolo elemento, ma viene associata ad un sistema territoriale nel suo complesso.

L'affidabilità dell'approccio proposto è stata verificata su un caso di studio, relativo al rischio di inondazione nel bacino del fiume Roja, posto in territorio transfrontaliero tra Liguria (I) e regione PACA (F).

È stato individuato nel ponte carrabile sul fiume Roja l'elemento che maggiormente influenza la funzionalità del sistema territoriale. Sebbene una considerazione analoga (a causa della relativa semplicità del sistema territoriale considerato) potesse essere effettuata anche semplicemente tramite l'analisi di un esperto territoriale, tale considerazione è da considerarsi incoraggiante poiché sottolinea l'affidabilità sia dei risultati, sia delle eventuali decisioni che possono essere prese sulla base di questi.

Inoltre è da sottolineare la rilevanza di tale analisi nell'ambito del particolare territorio considerato. Infatti, sebbene recentemente non si siano verificati nel bacino del fiume Roja eventi analoghi a quelli considerati nello studio, ciò è successo nelle regioni immediatamente limitrofe. Ad esempio, si ricorda il disastro del novembre 2000 nel comune di Sanremo, distante non più di 40 km dal bacino considerato in questo studio. Questo evento, documentato dal sistema informativo AVI (Aree Vulnerate Italiane) [16], ha provocato due morti, seri danni ai principali sistemi infrastrutturali (acquedotto e rete stradale) e perdite economiche, dirette o indirette, su gran parte del territorio circostante. Sulla base di tali considerazioni, sembra appropriato utilizzare strumenti che siano in grado di effettuare adeguate analisi territoriali anche da un punto di vista sistemico, e che siano in grado di fornire risultati affidabili ed utilizzabili, in fase di pianificazione territoriale, per definire al meglio le strategie di gestione delle emergenze.

La procedura di analisi di vulnerabilità sistemica sembra essere ben applicabile a quei sistemi territoriali caratterizzati da una considerevole complessità, sia per quanto riguarda la dimensione dell'area considerata, sia per quanto riguarda la numerosità degli elementi territoriali direttamente coinvolti nelle fasi immediatamente successive all'emergenza (sia perché richiedono servizio, sia perché lo devono fornire). Per tali ragioni, è preferibile applicare l'approccio all'analisi di sistemi territoriali a scala vasta.

Attualmente si sta lavorando per sviluppare ulteriormente l'approccio proposto in questo lavoro. Ad esempio, si sta focalizzando l'attenzione sulla specializzazione dei nodi inseriti nel grafo, poiché sembra più opportuno suddividerli in centri di domanda (ovvero i nodi che sono direttamente danneggiati dall'evento calamitoso) e centri di offerta (ovvero i nodi che sono preposti alle attività di gestione delle emergenze). Inoltre sembra opportuno specificare meglio anche il concetto di funzionalità, associando un termine di "criticità" ai centri di domanda ed un termine di "efficienza" ai centri di offerta.

5. RINGRAZIAMENTI

Il lavoro presentato in questo articolo è stato parzialmente finanziato su fondi di progetti EU-INTERREG.

6. ELENCO DEI SIMBOLI

d_i	livello di danno fisico dell' i -esimo elemento territoriale
$f_i^k(\cdot)$	funzione di vulnerabilità dell'elemento i -esimo rispetto al rischio naturale di tipo k
I	indice globale di funzionalità del sistema territoriale
I^T	indice globale di funzionalità relativo ad uno scenario caratterizzato da periodo di ritorno T
N	numero di elementi del sistema territoriale
N_{max}	numero massimo di possibili iterazioni della procedura di valutazione della vulnerabilità sistemica
$P(i)$	insieme dei nodi predecessori del nodo i
T	periodo di ritorno caratteristico di un evento
$w_{ij}(\cdot)$	funzione di influenza dell'elemento j sull'elemento i
x_i	livello di integrità funzionale dell'elemento i

x_i^0	livello di funzionalità intrinseca dell'elemento i
y_i	livello di integrità fisica dell' i -esimo elemento territoriale
$\tilde{\alpha}_i$	parametro che esprime l'influenza del livello di integrità fisica dell'elemento i sulla sua funzionalità intrinseca
α_{ij}	parametro di importanza dell'influenza del nodo j sul nodo i
Δx_i	differenza tra il livello della funzionalità intrinseca x_i^0 di un elemento i e il livello di funzionalità x_i , corrispondenti ad un dato scenario
$\varphi_i(\cdot)$	funzione di vulnerabilità sistemica dell'elemento i -esimo
$\rho_i(\cdot)$	funzione di funzionalità intrinseca dell'elemento i
$\bar{\xi}_i^k$	vettore di sollecitazione esterna relativa al rischio naturale di tipo k agente sull' i -esimo elemento territoriale

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Zio, G.E. Apostolakis, Sensitivity and uncertainty analysis with a methodology for evaluating environmental restoration technologies, *Computer Physics Communications*, Vol. 117, pp. 1-10 (1999).
- [2] R. Accorsi, E. Zio, G.E. Apostolakis, Developing utility functions for environmental decision making, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 34, pp. 387-411 (1999).
- [3] E. Borgonovo, G.E. Apostolakis, A new importance measure for risk-informed decision making, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 72, pp. 193-212 (2001).
- [4] H. Tamura, K. Yamamoto, S. Tomiyama, I. Hatono, Modeling and analysis of decision making problem for mitigating natural disaster risks. *European Journal of Operational Research*, Vol. 122 (2), pp. 461-468 (2000).
- [5] P.J.H. Shoemaker, *Experiments on decisions under risk; the expected utility hypothesis*, Kluwer-Nijhoff, Boston (1980).
- [6] B.C. Ezell, J.V. Farr, I. Wiese, Infrastructure risk analysis model, *Journal of infrastructure systems*, Vol. 6. (3), pp. 114-117 (2000).
- [7] Y.Y. Haimes, P. Jiang,, Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures. *Journal of infrastructure systems*, Vol. 7 (1), pp. 1-12 (2001).
- [8] W. Leontief, Structure of the world economy: outline of a simple input-output formulation, *American Economic Review*, Vol. 64, pp. 823-834 (1974).
- [9] O. Varis, Bayesian decision analysis for environmental and resource management, *Environmental Modelling & Software*, Vol. 12 (2-3), pp. 177-185 (1997).
- [10] J. Pearl, *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann, San Francisco (1988).
- [11] O. Varis, S. Kuikka,, Learning Bayesian decision analysis by doing: lessons from environmental and natural resources management, *Ecological Modelling*, Vol. 119 (2-3), pp. 177-195, (1999).
- [12] R.A. Howard, J.E. Matheson, *The principles and applications of decision analysis*, Strategic Decisions Group, Palo Alto, CA (1984).
- [13] R. Schachter, Probabilistic Inference and Influence Diagrams, *Operations Research*, Vol. 36, pp. 589-604 (1988).
- [14] P. Shenoy, Valuation-Based systems for Bayesian Decision Analysis, *Operations Research*, Vol. 40, pp. 463-484 (1992).
- [15] G. Boni, A. Crosta, S. Laverneda, G. Roth, A.C. Taramasso, C. Versace, U-FLOOD-"URBAN FLOOD" modello di propagazione delle piene in ambiente urbano, *Proceedings of XXVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza (Italy)*, Vol. 1, pp. 453-460 (2002).
- [16] F. Guzzetti, M. Cardinali, P. Reichenbach, The AVI project: a bibliographical and archive inventory of landslide and flood in Italy, *Environmental Management*, Vol. 18, pp. 623-633 (1994).