

LA VULNERABILITÀ SISTEMICA IN AREE URBANIZZATE ESPOSTE AL RISCHIO COMBINATO DI FRANE ED INONDAZIONI

SYSTEMIC VULNERABILITY IN URBANIZED AREAS EXPOSED TO COMBINED RISK OF LANDSLIDE AND FLOOD

FRANCESCO SDAO^(*), AURELIA SOLE^(**), STEFANIA PASCALE^(**) & LUCIANA GIOSA^(**)

^(*) Università degli Studi della Basilicata - Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia Applicata - Potenza, Italy - E-mail: francesco.sdao@unibas.it

^(**) Università degli Studi della Basilicata - Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente - Potenza, Italy

RIASSUNTO

Questo lavoro analizza la "vulnerabilità sistemica" di un'area urbana complessa in occasione di un evento combinato di frana e di alluvione. La metodologia proposta differisce da quelle tradizionali basate su un approccio fisico, poiché si riferisce alla stima della "vulnerabilità sistemica" che misura le relazioni tra l'intensità degli eventi estremi e le conseguenze dirette e indirette di tali eventi sul sistema territoriale.

La stima della vulnerabilità sistemica è basata sull'applicazione di un modello di "vulnerabilità sistemica", ovvero un modello matematico-decisionale atto a valutare la vulnerabilità di un sistema territoriale complesso ad un evento combinato di frana e di alluvione utilizzando un gruppo di "indicatori di pressione" per definire, qualitativamente e quantitativamente, l'influenza esercitata sul sistema "territorio" da vari fattori come ad esempio, quelli fisici, sociali, economici, ecc.

In particolare, il modello stima il grado di esposizione a rischio combinato di frane e alluvioni. Questo accade per esempio quando eventi naturali diversi si verificano contemporaneamente o sono tra loro interconnessi. Per esempio, una frana, ostruendo un corso d'acqua, può determinare una sorta di diga, la cui rottura può generare effetti disastrosi a valle.

Il modello, costruito in ambiente GIS, si sviluppa secondo le seguenti fasi:

1. caratterizzazione topologica del sistema territoriale studiato e stima degli scenari relativi di frane e alluvioni;
2. analisi delle conseguenze dirette sul sistema relativamente ad uno specifico scenario;
3. definizione della vulnerabilità sistemica.

La vulnerabilità del sistema dovuta alla combinazione degli eventi calamitosi è stata valutata nell'area urbana di Potenza, (Italia meridionale), la quale è un'area caratterizzata da un diffuso dissesto idrogeologico. Si tratta di un'area urbana complessa per la presenza di molti elementi che possono essere, direttamente o indirettamente, coinvolti durante un evento disastroso: strade, abitazioni, centri funzionali e produttivi.

L'applicazione mostra che nel caso di un evento combinato di frane e alluvioni, la perdita di funzionalità degli elementi, che si trovano all'interno dell'area a rischio, può influenzare la funzionalità degli elementi ubicati esternamente a tali aree, ma, relazionati direttamente o indirettamente con i primi.

ABSTRACT

This paper aims to analyze the systemic vulnerability of an area as complex as urban when a flood and landslide occurs. The proposed approach of vulnerability evaluation, differs from those who prefer the traditional physical sense because of it provides an analysis of "systemic vulnerability" measuring the relationship between extreme event's magnitude and direct and indirect consequences of this event on the territorial system.

The model is an application of a mathematician-decisional model action to estimate the vulnerability of a complex territorial system to the landslide and flood events. The model uses a group of "pressure pointers" in order to define, qualitatively and quantitatively, the influence exercised on the territory system from factors like as an example, those physicists, social, economic, etc.

In particular, the model assesses the degree of exposure to the combined risk of natural phenomena as landslide and flood. This occurs, for example, when different natural events trigger at the same time, or are linked one to the other. For instance, landslides may obstruct the regular stream flow and produce a dam breaking effect downstream.

This model, anchored in a GIS system, is characterized by the following phases:

1. topological characterization of the studied territorial system and assessment of the scenarios in terms of spatial landslide and flood hazard;
2. analysis of the direct consequences of a scenario event on the system;
3. definition of the assessing model of the systemic vulnerability in combined landslide and flood areas.

The vulnerability of the system due to combined landslide and flood areas was evaluated in the urban area of Potenza city, in the south of Italy, which is well known for being characterized by a widespread state of hydrogeological upheaval. This is an area complicated by the presence of many elements that may be involved directly or indirectly during the disaster: roads, houses, offices, industries.

The application shows that, during a combined landslide and flood event, the loss of functionality of the elements that fall within the risk areas may affect the functionality of elements farther but related, directly or indirectly, with them.

La procedura proposta può essere utilizzata come supporto nelle decisioni di pianificazione territoriale, nelle analisi delle conseguenze degli eventi combinati di frana e alluvioni su sistemi territoriali complessi, e nella definizione delle priorità di intervento.

TERMINI CHIAVE: vulnerabilità sistemica, reti di influenza, frane ed inondazioni

INTRODUZIONE

Frane, inondazioni, sismi possono produrre effetti disastrosi qualora interessino direttamente aree urbanizzate (AA. VV., 1983; GULLÀ & SDAO, 2001; PETRUCCI & POLEMIO, 2003). Oltre a provocare perdite di vite umane, che costituiscono la condizione prioritaria di prevenzione ed intervento, possono danneggiare in maniera più o meno seria i cosiddetti “esposti vulnerabili” presenti sul territorio, come ad esempio costruzioni o infrastrutture, e provocare danni e disservizi temporanei o permanenti alle attività di servizio, economiche e produttive. E’ evidente, pertanto, l’importanza di conoscere, già durante la fase di pianificazione urbana, gli scenari possibili conseguenti a un certo evento catastrofico con assegnata probabilità di accadimento e, infine, gli effetti di eventuali azioni di prevenzione e mitigazione posti in essere nella fase pianificatoria. A tale scopo un’accurata ed efficace pianificazione deve avvalersi delle informazioni, delle metodologie e degli strumenti che la comunità scientifica mette a disposizione e costantemente aggiorna.

Nel presente lavoro si illustra un modello di vulnerabilità al rischio combinato di frana e inondazione di tipo sistemico, che considera il sistema urbano nella sua interezza, considerando oltre alla vulnerabilità fisica anche una vulnerabilità indotta dalla perdita di funzionalità dei diversi elementi territoriali e infrastrutturali interessati dall’evento. Tale modello già proposto per lo studio della vulnerabilità sistemica in aree soggette separatamente al rischio di frana (PASCALE *et alii*, 2010) e al rischio di inondazione (PASCALE *et alii*, 2009) è stato opportunamente modificato e integrato per tenere in conto della vulnerabilità combinata di due eventi che possano verificarsi in concomitanza. La vulnerabilità combinata è stimata mediante un modello matematico-decisionale e si basa su una rete di influenza che tiene in conto le relazioni funzionali intercorrenti tra gli elementi che compongono il sistema territoriale urbano. Il modello proposto si basa sugli studi di TAMURA *et alii*, 2000; EZELL *et alii*, 2000; HAIMES & JIANG, 2001; MINCIARDI *et alii*, 2004; MINCIARDI *et alii*, 2006; PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii*, 2010 e considera la vulnerabilità non come caratteristica di un particolare elemento territoriale ma, come caratteristica di un sistema complesso in cui gli elementi sono tra loro funzionalmente legati. Tale analisi si basa sull’individuazione delle funzionalità esistenti. Non si può dare una valutazione complessiva della funzionalità di un sistema territoriale senza tenere in debito conto le relazioni 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. Prendendo in considerazione, ad esempio, un ospedale collegato ai centri urbani limitrofi tramite un’unica strada: se, per qualche motivo (es. un’inondazione)

The proposed procedure is to act as a support in planning decisions, in analyses of the consequences of combined landslide and flood events on complex territorial systems, and in defining intervention priorities.

KEY WORDS: systemic vulnerability, network of influence, landslide and flooding

INTRODUCTION

Landslides, floods, earthquakes can produce catastrophic effects on a given urbanized territory (AA. VV., 1983; GULLÀ & SDAO, 2001; PETRUCCI & POLEMIO, 2003). Not only they often cause loss of human lives but they can also cause more or less serious damage to the so-called “vulnerable elements” of the territory, such as buildings or infrastructure as well causing damage and temporary or permanent malfunctioning of economic, service and productive activities.

It is obvious, therefore, that is important, even during the planning phase of a city, the knowledge of the most likely catastrophic scenarios that could verify and the consequences of prevention and mitigation actions. For this a careful and effective planning can make use of information, methodologies and tools that the scientific community provides and constantly updates.

A vulnerability model on combined landslide and flood risk is exposed in this work. It is a systemic model because of the all urban system is considered: in this case we evaluate the physic vulnerability and the vulnerability derived from the loss of functionality of the territorial and infrastructural elements involved in the disaster. This model already proposed for the study of systemic vulnerability in landslide prone areas at risk or of landslide (PASCALE *et alii*, 2010), or at risk of inundation (PASCALE *et alii*, 2009) is has been appropriately modified and supplemented to take into account the combined vulnerability of two events that can occur in the same time.

The combined vulnerability is defined by a mathematical model-making and relies on a network of influence that takes into account the functional relationships between elements that make up the urban system. The proposed assessment model is based on the studies of TAMURA *et alii*, 2000; EZELL *et alii*, 2000; HAIMES & JIANG, 2001; MINCIARDI *et alii*, 2004; MINCIARDI *et alii*, 2006; PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii* 2010, and regards vulnerability not as a characteristic of a particular element at risk but as the specificity of a complex territorial system whose diverse elements are functionally related.

This analysis is based on the identification of existing functionalities. You can not give an overall assessment of functionality of a territorial system without taking into account the relationships among its subsets; In fact, the overall functionality of the system, may decrease due to direct stress on the individual components of the territorial system, either due to loss of function induced by the links between the different subsets. This claim becomes clear when one considers, for example, a hospital attached to the neighboring urban centers through a single road. if for some reason (eg a flood) that road is not pass-

tale strada non è transitabile, l'ospedale perde la propria funzionalità anche se non ha subito nessun danno diretto. Qualora il sistema territoriale fosse colpito da inondazione e/o da frana, l'approccio può essere utilizzato per individuare sia l'elemento più "critico", quello che presenta una perdita maggiore della propria funzionalità, sia l'elemento "decisivo", quello con maggiori ripercussioni sul sistema e, pertanto, avente un ruolo decisivo nella gestione dell'emergenza.

L'APPROCCIO METODOLOGICO

In generale, le metodologie messe a punto per valutare la vulnerabilità di un sistema territoriale privilegiano soprattutto l'accezione fisica della stessa, definendola come misura dei danni fisici che l'elemento subisce a seguito di un qualsiasi evento esterno (FERA, 1991; GALLI & GUZZETTI, 2007). Quando si passa dall'analisi di vulnerabilità del singolo manufatto a quella dell'insediamento o, addirittura, di una città si incontrano una serie di difficoltà di tipo concettuale ed operativo che dipendono dalla complessità della realtà in cui si opera e dall'elevato numero degli elementi coinvolti e delle loro relazioni. Complessità e molteplicità degli elementi finiscono, di fatto, per accrescere la vulnerabilità dei singoli oggetti.

Quando l'analisi di vulnerabilità è estesa ad un ampio contesto territoriale come quello di una città, non si può prescindere dal considerare l'oggetto di studio come un sistema, o meglio, l'insieme di più sistemi (MINCIARDI *et alii*, 2004; MINCIARDI *et alii*, 2006; PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii*, 2010; TAMURA *et alii*, 2000; EZELL *et alii*, 2000; HAIMES & JIANG, 2001).

La lettura del sistema territoriale, in questo caso, consiste nell'identificare, da una parte, le sue componenti e dall'altra le sue connessioni o interazioni. A questo scopo si propone una procedura basata sulla schematizzazione del territorio attraverso una rete G(E,A) (Fig. 1), dove E è l'insieme dei nodi e A è l'insieme degli archi che li connettono (PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii*, 2010; SDAO *et alii*, 2010).

I nodi appartenenti all'insieme E rappresentano tutti gli elementi territoriali rilevanti per il sistema: 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 di polizia o dei vigili del fuoco), lineari (come tratti di infrastrutture stradali, ferroviarie ecc.) 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.

able, the hospital loses its functionality although it has not suffered any direct harm. If the territorial system was hit by flooding and / or landslide, the approach can be used to identify the most "critical", the one that has a greater loss of its function and the most "important" element, the one with more impact on the system and thus having a decisive role in emergency management.

THE METHODOICAL APPROACH

Generally, methodologies for assessing the vulnerability of a territorial system prefer the physical sense; so the vulnerability is defined as a measure of physical damage of which the element is suffering as a result of any external event (FERA 1991; GALLI & GUZZETTI, 2007). When you switch from the analysis of vulnerability of a single element to the entire establishment or, even, to a city, there is a combination of conceptual and operational difficulties that depend on the complexity of the system considered and on the high number of elements involved and their relationships. Complexity and multiplicity of the elements end up, in fact, to increase the vulnerability of the objects.

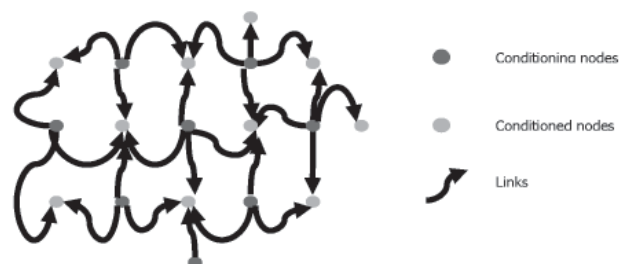
When the analysis of vulnerability is extended to a wider territorial system such as a city, the area of study must be considered as a system, or rather, as a set of multiple systems (MINCIARDI *et alii*, 2004; MINCIARDI *et alii*, 2006; PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii*, 2010; TAMURA *et alii*, 2000; EZELL *et alii*, 2000; HAIMES & JIANG, 2001).

In this case, the reading of the territorial system is to identify the one hand, its components and its connections, or other interactions. For this reason, in this work the territory is described by a network G(E, A) (Fig. 1), where E is the set of nodes and A is the set of links (PASCALE *et alii* 2009; PASCALE *et alii*, 2010; SDAO *et alii*, 2010).

The nodes of E are all the relevant elements in the system. The damage or lack of one feature of these elements can affect the proper function of the territorial system as a whole. These nodes can represent spatial point elements (such as hospitals or firefighters stations), linear elements (such as roads, railways,..) or polygonal elements (such as neighborhoods or industrial districts).

The links of A, instead, are the influences among the features of the spatial elements (or nodes). In particular, an element influences another element when the decrease in the efficiency of the first one compromises the functionality of the second.

Fig. 1 - Schema della rete di influenza
- Scheme of network of influence



LE VARIABILI DELLA VULNERABILITÀ SISTEMICA

Quando si verifica un disastro naturale k, per ogni nodo i di E (set di nodi) vengono definite le seguenti variabili:

- $\vec{\xi}_i^k$: vettore di sollecitazione esterna agente sull'i-esimo elemento;
- y_i : funzione di vulnerabilità sia fisica che socio-economica dell'elemento i-esimo;
- x_i^0 : livello di funzionalità intrinseca valutato esclusivamente sulla base della sua integrità fisica;
- x_i : livello di integrità funzionale valutato a partire dai soli legami tra i vari elementi;
- $w_{ij}(x_j)$: livello di influenza del j-esimo elemento sul livello di funzionalità dell'i-esimo elemento.

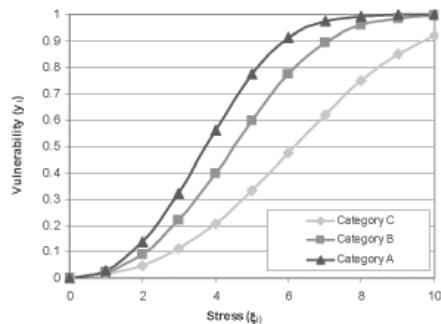
VALUTAZIONE DEL VETTORE DI SOLLECITAZIONE ESTERNA $\vec{\xi}_i^k$

Le componenti del vettore $\vec{\xi}_i^k$ 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 all'intensità dell'evento di inondazione (portata, tirante idrico ecc.); mentre per il rischio di frana alla magnitudine delle stessa che può essere espressa come i parametri caratteristici delle frane (velocità, energia, dimensione ecc).

FUNZIONE DI VULNERABILITÀ SIA FISICA CHE SOCIO-ECONOMICA y_i

Tale funzione di vulnerabilità sia fisica che socio-economica y_i definisce il livello di vulnerabilità di un elemento in occasione di un evento k e, in funzione della calamità naturale considerata, fornisce, una stima quantitativa dell'intensità del danno in seguito ad uno stress sull'elemento i-esimo.

Facendo riferimento al caso più semplice di stress come quantità scalare, la vulnerabilità può essere definita attraverso una funzione di tipo esponenziale nota come funzione di Gauss. Tale curva è descritta nell'Equazione 1 e mostrata in Fig. 2 (PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii*, 2010), dove A, B e C rappresentano diverse categorie di elementi a rischio alluvione e/o frana ognuna con differenti caratteristiche fisiche, sociali ed economiche. L'importanza di tali caratteristiche aumenta passando dalla classe A a quella C.



SYSTEMIC VULNERABILITY VARIABLES

During a k disaster, for each i node of E (set of nodes) the following variables are defined as:

- $\vec{\xi}_i^k$: vector of external solicitation on i-th element;
- y_i : physical, social and economic vulnerability function of i-th element;
- x_i^0 : level of intrinsic functionality evaluated only by physical integrity of the element;
- x_i : level of functional integrity also depends on the links between the elements;
- $w_{ij}(x_j)$: level of influence of the j-th element on the functionality level of the i-th element

THE VECTOR OF EXTERNAL SOLICITATION EVALUATION $\vec{\xi}_i^k$

The components of the vector $\vec{\xi}_i^k$ are physical quantities and describe the intensity of the extreme event (k) for each element. These quantities can be modeled either as a set of variables combined randomly, either as deterministic variables, when a scenario is carried out. For example, for floods, these components may be the inundation's intensity (discharge, water depth, ..); while for the risk of landslides, they may be their magnitude that can be expressed as the characteristic parameters of landslides (speed, power, size, etc.).

THE PHYSICAL, SOCIAL AND ECONOMIC VULNERABILITY FUNCTION y_i

The function of vulnerability y_i evaluates the degree of vulnerability of an element when it is stressed by a natural disaster.

Therefore, it (related to the a particular disaster k) provides a quantitative assessment of the damage intensity due to a stress on the i-th element.

Considering the simplest case where stress is seen as a simple scalar quantity, then the vulnerability can be defined by a curve which corresponds to a mathematical function of exponential type, known as Gaussian function. This function is described in Equation 1 and its shape is shown in Fig. 2 (PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii*, 2010), where the categories A, B and C are sets of risk elements with different physical, social and economic features. The importance of these features moving from category A to C.

Fig. 2 - Curve di vulnerabilità per le differenti categorie di elementi a rischio
- Vulnerability curve for the different categories of risk elements

La vulnerabilità di un elemento esposto ad una catastrofe naturale varia da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) ed è calcolata attraverso la seguente equazione:

$$y = 1 - a \cdot \frac{e^{-\alpha \bar{\xi}_i^{2,2}}}{(1 + e^{-\alpha \bar{\xi}_i^{2,2}})} \quad (1)$$

dove $\bar{\xi}_i^k$ è lo stress per il rischio considerato; a è una costante che assume un valore pari a 2 ed è calcolata fissando le condizioni al contorno ($\bar{\xi}_i^k = 0$ e $y = 0$, dove $y = 0$ rappresenta 0% di vulnerabilità, cioè nessuna perdita) e α è una variabile che dipende dal tipo di elemento a rischio, calcolata fissando le condizioni al contorno ($3 < \bar{\xi}_i^k < 6$; $0,3 < y < 1$, in una condizione di media e alta vulnerabilità) ed è uguale a 0.02. Per tenere in debito conto le caratteristiche socio-economiche del singolo elemento e la densità di popolazione dell'area considerata, l'equazione 1 è stata modificata inserendo un fattore di correzione al parametro α . α risulta, pertanto, pari a 0 quando la densità di popolazione è minore di 5000 ab/km², 0.1 quando la densità di popolazione varia tra 5000 e 100000 ab/km² e 0.2, infine per densità maggiore di 100000 ab/km².

LIVELLO DI FUNZIONALITÀ INTRINSECA x_i^0

La funzionalità intrinseca x_i^0 descrive le condizioni di integrità funzionale dell'elemento territoriale considerato e dipende direttamente dalla sua vulnerabilità senza prendere in considerazione l'eventuale interconnessione funzionale con gli altri nodi o entità. La variabile che esprime il livello di funzionalità intrinseca di un elemento può assumere valori compresi nell'intervallo continuo tra 0 (funzionalità intrinseca ottimale) e 1 (funzionalità intrinseca scarsa).

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

dove y_i rappresenta il valore di vulnerabilità calcolata nel nodo i-esimo e $\tilde{\alpha}_i$ è un parametro che esprime la relazione tra il livello di funzionalità x_i^0 del nodo i e la vulnerabilità y_i , cioè esprime l'influenza del livello di vulnerabilità y_i dell'elemento i sulla sua funzionalità intrinseca x_i^0 , ossia la corrispondenza tra il danno fisico e la perdita di funzionalità.

IL LIVELLO DI INTEGRITÀ FUNZIONALE X_i ED IL LIVELLO DI INFLUENZA DEL J-ESIMO ELEMENTO SUL LIVELLO DI FUNZIONALITÀ DELL'I-ESIMO ELEMENTO $w_{ij}(x_j)$

Il livello di integrità funzionale x_i , oltre a fornire dati sulla funzionalità del nodo i, dà anche informazioni relative alla funzionalità degli altri nodi. Tale variabile assume valori tra 0 e 1, dove 0 indica la completa integrità funzionale dell'elemento territoriale e la totale perdita di integrità. Per ciascun nodo considerato nello scenario di disastro, il livello di integrità funzionale è espresso tramite la seguente equazione:

The vulnerability of the elements exposed to a natural disaster varies from 0 (no loss) to 1 (total loss) and it's calculated by the following equation:

where $\bar{\xi}_i^k$ is the stress in relation to the considered risk; a is a constant which takes on a value equal to 2 and is calculated by fixing the boundary conditions ($\bar{\xi}_i^k = 0$ e $y = 0$, where $y = 0$ represent 0% of vulnerability, i.e. no loss); α variable which depends on the risk element type (above mentioned category) calculated by fixing boundary conditions ($3 < \bar{\xi}_i^k < 6$; $0,3 < y < 1$ in a condition of medium to high vulnerability) and is equal to 0.02. To take into account also social and economic features of the element and of population density in a particular area, the equation 1 has been modified, inserting a correction factor to α parameter. α is 0 when the population density is less than 5000 inhabitants on square kilometer, 0.1 when the population density is between 5000 e 100000 inhabitants on square kilometer and, finally, it is 0.2 when the population density is greater than 100000 inhabitants on square kilometer.

THE LEVEL OF INTRINSIC FUNCTIONALITY x_i^0

Intrinsic functionality x_i^0 describes the conditions of functional integrity of territorial elements and it is evaluated only by physical integrity of the element. It directly depends on its physical vulnerability. The variable x_i^0 can take on values between 0 and 1: 1 indicates a low value of intrinsic functionality (element outside the system) and 0, an optimal value of intrinsic functionality (optimal value means that the element keeps on operating correctly after the event occurred).

where y_i is the vulnerability in the i-th node calculated by the equation (1), $\tilde{\alpha}_i$ is a parameter which expresses the relation between the level of functionality x_i^0 of the i-th node and the vulnerability y_i (it express the influence of the vulnerability level y_i of the i-th element on its intrinsic functionality x_i^0 , i.e. the nexus between the physical damage and the loss of functionality).

THE LEVEL OF FUNCTIONAL INTEGRITY X_i AND THE LEVEL OF INFLUENCE OF THE J-TH ELEMENT ON THE FUNCTIONALITY LEVEL OF THE I-TH ELEMENT $w_{ij}(x_j)$

The level of functionality x_i describes the conditions of functional integrity of the i-th element in relationship to the other nodes and it also depends on the links between the elements. The variable x_i varies from 0 to 1, where 0 indicates complete functional integrity and 1 total loss of integrity. For each node within the specified disaster scenario, a level of functional integrity x_i is attributed according to the following equation:

$$x_i = \min(x_i^0, w_{ij}(x_j), \forall j \in P(i)) \quad (3)$$

dove la funzione $w_{ij}(x_j)$ esprime il livello di influenza dell'elemento j sul livello di funzionalità dell'elemento i . Per esempio, se a seguito di un evento catastrofico, un ospedale non subisce un danno fisico, ma è connesso da una sola strada che viene distrutta, l'ospedale non subirà una perdita di funzionalità intrinseca, ma di integrità funzionale. Tale variabile è espressa attraverso l'uso di una funzione monotona non decrescente ed è definita a partire da dominio e codominio contenuti nell'intervallo $[0,1]$ (PASCALE *et alii*, 2009; SDAO *et alii*, 2010). Essa mostra l'influenza della funzionalità dell'elemento j sulla funzionalità dell'elemento i .

$$w_{ij}(x_j) = (1 - 0.1\alpha_{ij}) \frac{(1 - e^{-\alpha_{ij}x_j^2})}{(1 - e^{-\alpha_{ij}})} + 0.1\alpha_{ij} \quad (4)$$

dove α_{ij} è un parametro che caratterizza l'arco, cioè la relazione tra il nodo i e il nodo j . Si noti che:

- quando l'influenza di j su i è forte, ad una elevata riduzione del livello di funzionalità dell'elemento i deve corrispondere una modesta riduzione del livello di funzionalità dell'elemento j ;
- quando l'influenza di j su i è debole, ad una modesta riduzione del livello di funzionalità dell'elemento i deve corrispondere una modesta riduzione del livello di funzionalità dell'elemento j .

INDICE GLOBALE DI FUNZIONALITÀ SISTEMICA

Il passo conclusivo della procedura è il calcolo dell'indice globale I di funzionalità del sistema definito come la media su tutti gli elementi considerati dei valori di integrità funzionale:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (5)$$

Questo indice esprime il valore dell'integrità funzionale su tutti gli elementi considerati nell'intervallo $[0; 1]$ dove 0 indica nessuna perdita funzionale, mentre 1 perdita totale di funzionalità.

L'AREA DI STUDIO

Lo scenario combinato di frana ed inondazione considerato in questo lavoro interessa la località "Varco d'Izzo" del Comune di Potenza: si tratta di un'area interessata da una recente e diffusa urbanizzazione, costellato da estese trasformazioni antropiche e da alcune importanti vie di comunicazione (S.S. Basentana, Linea ferroviaria Potenza-Metaponto). Qui il Fiume Basento scorre in corrispondenza dell'area urbanizzata della città ed il versante in sinistra del fiume, su cui ricade la porzione urbana orientale, è in gran parte interessato da grandi bacini di frana antica (Fig. 3).

Le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e sismiche fanno della Basilicata (Italia meridionale) una regione del Mediterraneo a rischio, a causa dell'elevata intensità con cui si verificano i fenomeni geomorfologici. L'area è caratterizzata da movimenti di versante rilevanti ed estesi. Vari sono i meccanismi di innesco: quelli che nor-

where the function $w_{ij}(x_j)$ expresses the level of influence of j -th element on functionality level of i -th element. For example, if following a catastrophic event, a hospital does not suffer damage, but is connected by a single road that is destroyed, the hospital does not lose its intrinsic functionality, but its functional integrity. A monotonous non decreasing function characterized by the range $(0, 1)$ can describe the function $w_{ij}(x_j)$ (PASCALE *et alii*, 2009; SDAO *et alii*, 2010). It can represent the influence of j element functionality on i element functionality through the following expression:

where α_{ij} is a parameter which characterizes the link, i.e. the relation between the i -th and j -th node. Note that:

- when there is strong influence of j over i , a significant decrease in the level of the functionality of i element must correspond to a small decrease in the level of functionality of the j element;
- in case of weak influence of j over i , a small decrease in the level of the functionality i element must correspond to a small decrease in the level of functionality of j element.

GLOBAL INDEX OF SYSTEMIC FUNCTIONALITY

In the proposed procedure the final step is to calculate the global index I of systemic functionality: it is defined as the average value of functional integrity of all the considered elements and it can be expressed as:

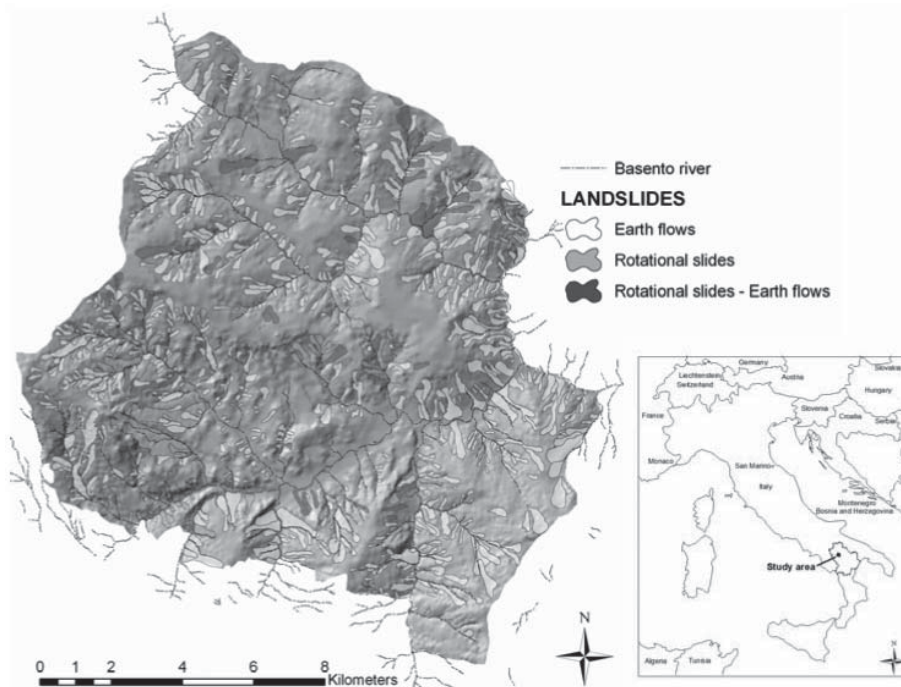
This index expresses varies from 0 to 1 where 0 indicates no functional loss, and 1 total functional loss.

STUDY AREA

The combined scenario of landslide and flood seen in this work involves the location "Varco d'Izzo" in Potenza city: it is an area affected by a recent and extensive urbanization, punctuated by widespread anthropogenic changes and crossed by some important roads (i.e.SS Basentana, Railway Potenza-Metaponto). Here the Basento River flows along the urbanized area of the city and the mountain on the left of the river, where is the eastern portion of the town, is largely affected by large and ancient landslide (Fig. 3).

Geological, geomorphological, climatic and seismic factors make Basilicata (Southern Italy) one of the Mediterranean regions at risk due to high-magnitude geomorphologic phenomena. The area is sensitive to extensive and severe slope movements. A variety of triggering mechanisms come into play, namely frequent

Fig. 3 - Area di studio. Carta inventario delle frane del territorio comunale di Potenza (Basilicata, sud Italia)
 - Study area. Landslide inventory map of the municipal area of Potenza (Basilicata, southern Italy)



malmente sono definiti terremoti (dal VIII al IX MCS), le periodiche e forti precipitazioni ed inondazioni (un evento ogni 6 mesi negli ultimi 80 anni) e lo sconsiderato comportamento umano. A volte queste frane hanno avuto luogo anche dopo piogge non necessariamente intense (POLEMIO & SDAO, 1996a; POLEMIO & SDAO 1996b; POLEMIO & SDAO, 1998, SDAO *et alii*, 1996; SDAO & SIMEONE, 2007).

L'area interessata dall'analisi di vulnerabilità sistemica è la città di Potenza ubicata nell'Italia meridionale (Fig. 3), la città conta circa 69.000 abitanti e rappresenta un sistema territoriale significativamente complesso a causa della presenza di fattori critici legati sia al rischio di alluvione che al rischio di frana.

LA CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA

Il territorio Comunale di Potenza si sviluppa su terreni riferibili ad una successione plio-pleistocenica poggiate su un basamento essenzialmente costituito da formazioni strutturalmente complesse di tipo fliscioide di natura argilloso-marmosa, riferibile in parte alle Unità Lagonegresi e in parte all'Unità Sicilide più comunemente note come Argille Varicolori di età Meso-Cenozoica che hanno preso origine durante le fasi tettoniche mioceniche della costruzione della catena appenninica. Le successioni plioceniche sono riferibili alle unità di Altavilla, caratterizzata da una successione essenzialmente conglomeratico-arenacea, affiorante ai bordi del bacino di Potenza (contrada Botte - Poggi di S. Michele), e di Ariano caratterizzata da una successione con una certa variabilità laterale che comprende litotipi conglomeratici, arenacei e argillosi.

earthquakes (VIII to IX MCS), periodically heavy rainfall and floods (one event every 6 months in the past 80 years) and reckless human behaviour. Sometimes such landslides have happened even after rainfall which was not heavy (POLEMIO & SDAO, 1996a; POLEMIO & SDAO 1996b; POLEMIO & SDAO, 1998, SDAO *et alii*, 1996; SDAO & SIMEONE, 2007).

The vulnerability of the system due to flooding is evaluated in the urban area of Potenza city, in the south of Italy (Fig. 3). Potenza has about 69,000 inhabitants and it has a complex territorial system characterized by some critical factors related to both landslide and flood risk.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS

The municipal area of Potenza developed on a terrain dating back to Plio-pleistocene succession on a base that is essentially made up of complex structural formations of a clayey-marly flyscioid type, belonging in part to the Lagonegresi Units and in part to Sicilide Units; this is more commonly known as Varicoloured Clays and dates back to the Meso-Cenozoic age, which originated during the Miocene age's tectonic of the construction of the Apennine Chain. The successions during the Pliocene dates to the Altavilla Unit, characterized by an essentially conglomeratic-arenaceous succession, outcropping on the edges of the Potenza basin (contrada Botte-Poggi di S. Michele), and to the Ariano Unit characterized by a succession with a particular lateral variability which includes conglomeratic, arenaceous and

Queste successioni si sono depositate in bacini interni alla catena appenninica (bacini intrappenninici) durante le fasi tettonogenetiche tardive, verificatesi dal Messiniano Superiore al Pliocene, successivamente coinvolte, dal Pliocene Superiore al Quaternario, da intense fasi tettoniche, a prevalente componente verticale, che hanno determinato l'attuale assetto della catena.

LA DISTRIBUZIONE DELLA FRANOSITÀ

La gran parte del territorio di Potenza è modellato in terreni fliocoidi strutturalmente complessi che, per caratteri litologici e strutturali, sono particolarmente predisposti a fenomeni di instabilità dei versanti (Fig. 3). Studi recenti hanno evidenziato che in tale area la maggior parte dei versanti sono interessati da frane di diverso tipo e dimensioni, molte delle quali attive che periodicamente hanno apportato gravi e diffusi danni alle cose e talvolta anche alle persone. L'approccio metodologico per la definizione dello stato di franosità delle del territorio di Potenza si è avvalso della sinergia tra i metodi della geomorfologia applicata ed evolutiva, le tradizionali tecniche di riconoscimento delle frane (costituite dall'analisi di foto aeree e di elaborati cartografici) e il rilevamento geomorfologico. Negli studi si è tenuto conto dei risultati scaturiti da ricerche ed indagini precedentemente svolte e riguardanti sia le aree selezionate che quelle contorni. Inoltre le ricerche si sono avvalse di: accurati rilievi geologici e geomorfologici, scala 1:2.000 o 1:5.000, condotti negli 1998 e 1999, 2004; elaborazione ed interpretazione di dati geognostici ed inclinometrici relativi a molte decine di sondaggi eseguiti nelle aree in esame e in corrispondenza dei principali corpi di frana riconosciuti e interpretazione, anche comparata, di foto aeree di diversa età e scala.

L'attuale situazione di instabilità dei versanti delle aree esaminate è stata, quindi, evidenziata su un'apposita carta inventario delle frane, a scala 1:5.000 che prevede per ogni frana che vengano indicati la tipologia di movimento, lo stato di attività e la direzione del movimento. Nel territorio di Potenza sono state riconosciute un totale di 920 frane che ricoprono un'area di circa 46 km² dell'intera area di studio (175,38 km²) (CANIANI *et alii*, 2008). Le caratteristiche dei movimenti franosi spaziano dagli scorrimenti rotazionali alle frane di colata rapida con differente fase di movimento ed è importante sottolineare che molte frane raggiungono spessori apprezzabili anche maggiori di 15-20 m.

IL PERICOLO DI INONDAZIONE

La città di Potenza è bagnata da uno dei più importanti fiumi della Basilicata, il Basento, e da una serie di torrenti e fossi che interferiscono direttamente con le aree residenziali, commerciali ed industriali (Figura 4).

Il Basento ha una lunghezza dell'asta principale di circa 157 km ed un bacino idrografico alla foce di circa 1535 km² di estensione. Nel territorio comunale, proprio lungo le sue sponde, si sono sviluppate nel tempo le principali attività industriali della città: qui il Basento ha una pendenza di fondo alveo di circa 0.6% e una profondità media pari a 1.5 m.

Gli altri torrenti e fossi che scorrono nel territorio comunale di Po-

argillaceous lithotypes.

These successions were deposited in basins within the Apennine Chain during the late tectonic phases (Upper Messiniano-Pliocene), and later involved in intense tectonic phases with a prevalently vertical component from Upper Pliocene to Quaternary, which have determined the present shape of the Chain.

LANDSLIDES DISTRIBUTION

Most of the territory of Potenza was formed in a structurally complex terrain which is particularly prone to slope instability phenomena because of its structural and lithological characteristics (Fig. 3). Recent studies have shown that, in this area, most slopes show a tendency to landslide of various types and dimensions. Many of them are active and periodically cause serious widespread damage to things and sometimes to people. The methodological approach for the definition of the state of the landslide activity in the area of Potenza took advantage of the synergy between the methods of applied and evolutive geomorphology, traditional techniques for the recognition of landslides (aerial photo analyses and cartographic elaborations) and geomorphological surveys. Studies have also taken into consideration the results of previous research regarding the area under study and its bordering areas. Moreover, in order to delineate a complete landslide inventory map of the area under study, many data were utilized: accurate geological and geomorphological surveys, scale 1:2,000 or 1:5,000, carried out in 1998, 1999 and 2004; geognostic and inclinometric data related to many boreholes carried out in the area under study and in correspondence with the main body of recognized landslides; a comparative analysis of aerial photography of diverse periods and scale was made.

The present situation of slope instability of the examined areas was shown on a landslide inventory map drawn up for this purpose, on a scale of 1:5,000, which shows, for every indicated landslide, movement typology, state of activity and direction of movement. A total number of 920 landslides, covering about 46 km² of the study area (175.38 km²) are recognized in the study area (CANIANI *et alii*, 2008). The characteristics of landslide movements vary from rotational slides to rapid earth-flows with different phases of movement. It is important to note that many of the landslides are significantly thick, more than 15-20 m, and that the earth-flows are the most common.

FLOOD HAZARD

The city of Potenza is watered by one of the most important rivers of the Basilicata, the Basento, and a series of streams and ditches that directly interfere with its residential, commercial and industrial areas (Figure 4).

The Basento River is about 157 km long and its catchment area, at the mouth, is approximately 1535 km². Right along its banks, in the municipal area, major industries of the city have developed over time: here the Basento River has a bed slope of approximately 0.6% and an average depth of 1.5 m.

tenza (Gallitello, Verderuolo, Malvaccaro,) possono ragionevolmente considerarsi piccoli corsi d'acqua dal momento che i loro bacini idrografici hanno un'estensione minore di 25 km². Tuttavia, i numerosi interventi (tombini, attraversamenti, canalizzazioni,...) che nel tempo sono stati realizzati lungo le loro aste fluviali per favorire lo sviluppo urbano connessi ad una insufficiente manutenzione, rendono le aree limitrofe a tali corsi d'acqua particolarmente esposte a fenomeni di allagamento. Sempre più spesso, anche in occasione di eventi di pioggia non eccezionali, la città di Potenza vive i disagi connessi all'allagamento di strade e di edifici (ai piani interrati e terra) causati dalla esondazione dei corsi d'acqua che la attraversano.

Le aree esposte ad inondazione lungo il Fiume Basento sono state individuate dall'Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata (PAI AdB BASILICATA, 2008), secondo quanto previsto dalla normativa in vigore in Italia. Gli eventi di piena considerati nella perimetrazione delle aree inondabili si riferiscono a tempi di ritorno T di 30, 200 e 500 anni. Lungo i corsi d'acqua minori, invece, la delimitazione delle aree inondabili accompagna la recente redazione del nuovo Piano Urbanistico della città di Potenza (2009) e muove dalla necessità di verificare la compatibilità delle previsioni di piano con la pericolosità di inondazione lungo tali aste fluviali. In questo caso l'evento di piena considerato è quello con periodo di ritorno di 200 anni.

CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA TERRITORIALE

Un sistema territoriale complesso, come quello in esame, è costituito da diversi sottosistemi (distretti residenziali, infrastrutture, unità sanitarie,...) che sono interconnessi attraverso legami casuali e reciproci. La caratterizzazione di un siffatto sistema territoriale può essere realizzata attraverso tre *step* fondamentali: la caratterizzazione della rete G (E,A), l'analisi degli scenari di rischio e, infine, l'overlay mapping dei dati.

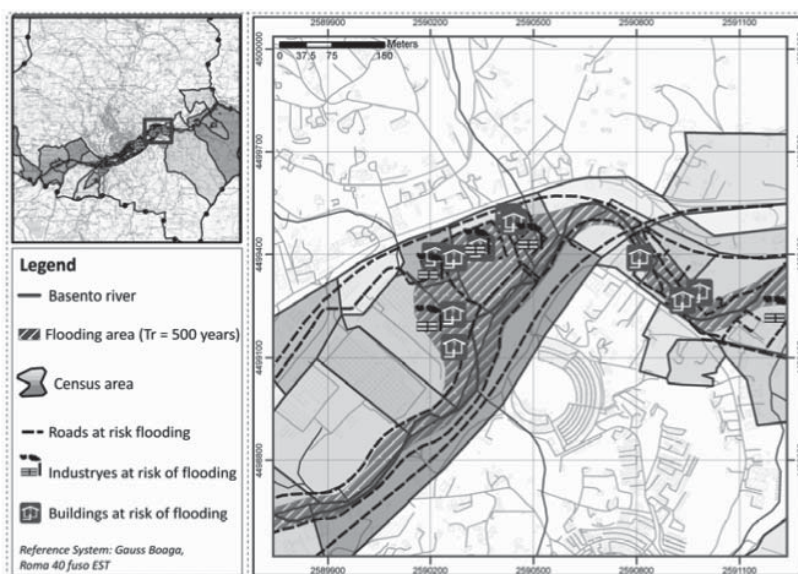
The other streams and ditches that run in the municipal area of Potenza (Gallitello, Verderuolo, Malvaccaro, ..) can reasonably be regarded as small streams because their catchment areas are less than 25 km². However, the numerous interventions (culverts, bridges, pipes, ...) that over time have been made along the river to help the urban development of Potenza linked to inadequate maintenance, make the areas adjacent to these waterways vulnerable to flooding. Increasingly, also if it rains shortly, the city lives the inconveniences of flooding in term of roads and buildings inundated (at basement and ground floor) caused by the flooding of rivers that cross it.

The areas exposed to flooding along the river have been identified by Interregional Basin Authority of Basilicata (BASILICATA AdB PAI, 2008), in accordance with the laws in force in Italy. The events considered in the delineation of flooded areas regards the 30, 200 and 500 years return period flows. Along the minor watercourses, however, the demarcation of flooded areas accompanies the recent drafting of the new urban plan of Potenza city (2009) and moves by the need to verify the compatibility of the plan forecasts the dangers of flooding along these river basins. In this case the event considered is the 200 years return period flow.

TERRITORIAL SYSTEM CHARACTERIZATION

Complex territorial systems are made up of many sub systems with specific functions (e.g. residential district, infrastructures, health centers,...) connected by causal and reciprocal relationships, its interactions are necessary to ensure a satisfactory and efficient functioning of this complex system. Territorial system characterization is realized by three steps: network characterization G(E,A), scenario analysis and overlay mapping of data.

Fig. 4 - Caratterizzazione della rete con indicazione dei collegamenti lineari tra gli elementi costituenti la rete
 - Network characterization with the linear links among the elements that form the network



| Conditioned nodes Conditioning nodes | Settlements | Route links | Headquarters | Health unities | Industries |
|---|-------------|-------------|--------------|----------------|------------|
| Settlements | 0 | 0 | I_{pi}^k | I_{hi} | 0 |
| Route links | I_{rj} | I_{mj} | I_{hj} | I_{ij} | I_{pm} |
| Headquarters | I_{mp}^k | I_{op}^k | I_{hp}^k | I_{rp}^k | 0 |
| Health unities | I_{os}^k | 0 | I_{rh} | I_{rh} | 0 |
| Industries | 0 | 0 | I_{pa} | I_{ha} | 0 |

Tab. 1 - Griglia delle influenze esistenti tra diverse categorie di elementi territoriali in un sistema complesso. Le categorie di elementi territoriali sono riportati nella riga e colonna principale e ogni cella contiene la formula delle influenze ($I_{a,b}$). Il valore 0 indica l'assenza di influenza.
- Grid of influences among territorial elements in a complex system. Categories of territorial elements are reported in main line and column and each cell of the grid contains the formula of influence ($I_{a,b}$). Zero value indicates no influence

CARATTERIZZAZIONE DELLA RETE

Per quanto riguarda la caratterizzazione della rete, essa può essere schematizzata mediante 18883 elementi (Fig. 4) di cui 1283 areali (quartieri residenziali), 5000 lineari (strade, ferrovia,...) e 21000 puntuali (incroci stradali, edifici,...).

L'influenza delle connessioni tra elementi (areali, lineari e puntuali) implica la determinazione di quelle categorie di elementi che sono influenzate da altre categorie durante l'evento calamitoso. La definizione del livello di influenza si basa su informazioni oggettive derivanti dalle analisi degli elementi che insistono sul sistema territoriale di interesse e si esplica attraverso opportune funzioni definite tenendo in conto sia le relazioni di domanda e offerta che la distanza tra elementi. Pertanto, per ogni coppia di categorie (a, b), è possibile definire un indice di influenza $I_{a,b}$ che assume valori all'interno dell'intervallo [0,1] (Tab. 1).

ANALISI DELLO SCENARIO

Lo scenario combinato di frana ed inondazione considerato in questo lavoro interessa la località "Varco d'Izzo" del Comune di Potenza.

Come già anticipato, gli eventi di piena considerati si riferiscono ai tempi di ritorno T di 30, 200 e 500 anni e sono stati perimetrati dall'Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata. Relativamente ai movimenti franosi, invece, nel caso considerato è presente uno scorrimento rototraslazionale - colata di terra, di genesi antica, che coinvolge l'intero versante di località "Varco d'Izzo" (PERRONE *et alii*, 2004; DI MAIO *et alii*, 2010).

DATA OVERMAPPING

La sovrapposizione degli scenari di piena e della frana con gli elementi caratterizzanti il sistema territoriale ha consentito di individuare tutti gli elementi direttamente coinvolti (Fig. 5 e 6). Si tratta, nello specifico, di 226 collegamenti stradali, 7 aggregati insediativi e 8 attività produttive per tutti e tre gli eventi di piena.

DETERMINAZIONE DELL'INTENSITÀ DELL'INONDAZIONE

L'intensità dell'inondazione è stata determinata attraverso una matrice contenente il tempo di ritorno della piena e l'altezza

NETWORK CHARACTERIZATION

The network has 18883 elements (Fig. 4) with 1283 areal elements (residential districts), 5000 lines (infrastructures: streets, roads, railways and so on) and 21000 points (crossroads, public buildings such as schools, local health centers, hospitals, military and fire stations, industries and so on).

The influence of the connection between the elements (points, lines and areas) defined consists of the determination of which categories of elements are influenced by which other categories of elements in an emergency phase. The definition of the level of such influences is based on objective informations deriving from the analyses of the elements which make up the territorial system under examination. This level is defined by some functions related to the relations of supply and demand and to the distance between the elements. Therefore, for each couple of categories (a, b) an index of influence $I_{a,b}$ is introduced and evaluated, these index take on values within the interval [0,1] (Tab. 1).

SCENARIO'S ANALYSIS

The combined scenario of landslide and flood seen in this work involves the location "Varco d'Izzo" in Potenza city.

As mentioned, the inundation events regard 30, 200 and 500 years return period flow and the Interregional Basin Authority of Basilicata has determined the flooded areas along Basento River. About landslides, however, here is an ancient rototranslational slide evolving into earthflow, which involves the entire side of locality named "Varco d'Izzo" (PERRONE *et alii*, 2004; DI MAIO *et alii*, 2010).

DATA OVERMAPPING

The overmapping of inundation events and landslide with the elements which characterize the territorial system is used to select items directly affected by events. (Fig. 5 and 6). These are, specifically, of 226 road links, 7 settlements and 8 productive activities for all three inundation events.

FLOOD INTENSITY

The magnitude has been measured by a matrix constituted by: time of return of the flood, water depth and flow velocity. The last two

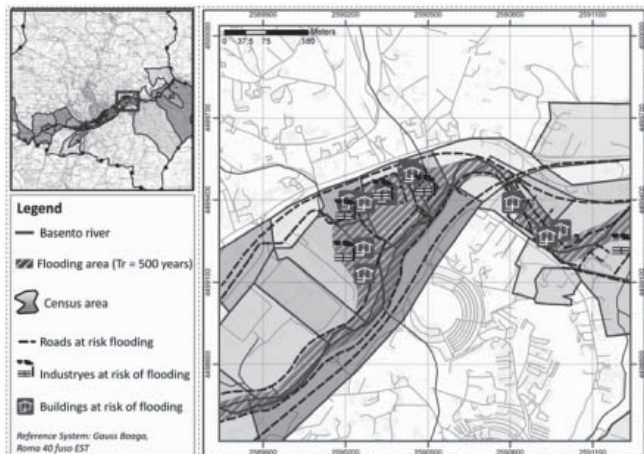


Fig. 5 - Data overmapping tra la città di Potenza e gli elementi a rischio di inondazione
 - Potenza city near Basento River data overmapping with areas and elements at risk of flooding

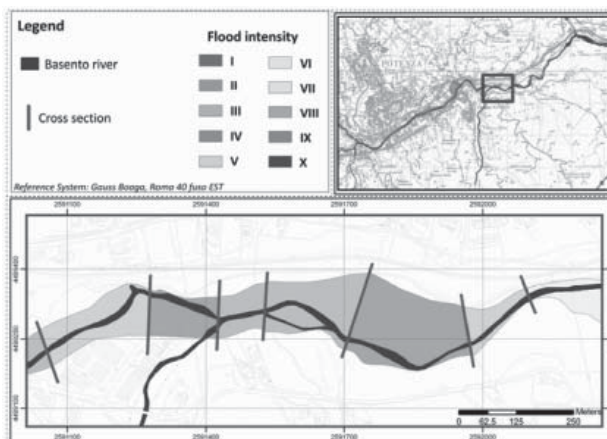


Fig. 6 - Data overmapping tra la città di Potenza e gli elementi a rischio di frana (PASCALE et alii, 2010, mod.)
 - Potenza city near Basento data overmapping with areas and elements at risk of landsliding (PASCALE et alii, 2010, mod.)

| <u>PARAMETERS</u> | <u>VALUES RANGE</u> | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|------------|-------------|-----------|----------|
| WATER DEPTH (m) | 0 - 1,5 | 1,51 - 2 | 2,1 - 2,5 | 2,51 - 3 | 3,1 - 4 | 4,1 - 5 | 5,1 - 6 | 6,1 - 7 | 7,1 - 8 | >8 |
| <i>Intensity score</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| VELOCITY (m/s) | 0 - 1 | 1,1 - 2 | 2,1 - 3 | 3,1 - 4 | 4,1 - 5 | 5,1 - 6 | 6,1 - 7 | 7,1 - 8 | 8,1 - 9 | >9 |
| <i>Intensity score</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| TIME OF RETURN (years) | 1-10 | 11-30 | 31-50 | 51-100 | 101-200 | 201-300 | 301-500 | 501-800 | 801-1000 | >1000 |
| <i>Intensity score</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| TOTAL SCORE | 0 - 0,4 | 0,5 - 0,8 | 0,9 - 1,2 | 1,3 - 1,6 | 1,7 - 2 | 2,1 - 2,4 | 2,5 - 2,8 | 2,9 - 3,2 | 3,3 - 3,6 | 3,7 - 4 |
| INTENSITY | <i>I</i> | <i>II</i> | <i>III</i> | <i>IV</i> | <i>V</i> | <i>VI</i> | <i>VII</i> | <i>VIII</i> | <i>IX</i> | <i>X</i> |

Tab. 2 - Matrice dell'intensità di inondazione con individuazione dei range di variabilità dei parametri idraulici considerati
 - Matrix of flood intensity with range of hydraulic parameters

Fig. 7 - Intensità dell'inondazione nella città di Potenza. Classificazione dell'intensità di inondazione (a sinistra e in alto) lungo il fiume Basento e suddivisa in differenti classi definite (in basso)
 - Flood intensity in Potenza city. Classification of flood intensity (on the left of the top) and Basento River subdivided into the different classes defined (on the bottom)



| PARAMETER | RANGE OF VALUES | | | | | | |
|----------------------------------|----------------------|--|---|---|---|------------------------|-------------|
| Volume (m ³) | «10 | 10-10 ² | 10 ² -10 ³ | 10 ³ -10 ⁴ | 10 ⁴ -10 ⁵ | >10 ⁵ | |
| Rating | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Velocity (m/s) | «5x10 ⁻¹⁰ | 5x10 ⁻¹⁰ - 5x10 ⁻⁹ | 5x10 ⁻⁹ - 5x10 ⁻⁸ | 5x10 ⁻⁸ - 5x10 ⁻⁷ | 5x10 ⁻⁷ - 5x10 ⁻⁶ | 5x10 ⁻⁶ - 5 | >5 |
| Rating | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Run out (Km) | «10 ⁻³ | 10 ⁻³ -10 ⁻² | 10 ⁻² -10 ⁻¹ | 10 ⁻¹ -10 ⁰ | >10 | | |
| Rating | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| Depth (m) | 1 | 1_12 | 12_25 | 25-35 | 35-50 | >50 | |
| Rating | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Affected area (Km ²) | «0,01 | 0,01-0,24 | 0,25-0,50 | 0,50-0,75 | 0,75-1 | >1 | |
| Rating | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Deformation | eterogenea | omogenea | continua | discontinua | | | |
| Rating | 4 | 2 | 4 | 2 | | | |
| Typology | (Slowly) Earth flow | Roto-translationl slides | Rock slides | Rapid earth flow | Rockfalls | topples | Debris flow |
| Rating | 2 | 4 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 |

Tab. 3 - Intensità di frana con individuazione dei range di variabilità dei parametri considerati
 - *Landslide intensity with range of parameters*

| | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| TOTAL RATING | 11 | 11_14 | 14_18 | 18_22 | 22_26 | 26_30 | 30_34 | 34_38 | 38_42 | 42 |
| MAGNITUDE | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X |
| INTENSITY | Very slow | | | | | | | | | Extremely rapid |

(I) movement of a small area only perceived through extremely sophisticated instruments
 (X) violent movement of a large mass causing damage to several elements

Tab. 4 - Intensità di frana con individuazione dei range di variabilità dei parametri considerati
 - *Landslide magnitudo and intensity*

e la velocità della corrente esternamente all'alveo fluviale. A ciascun parametro sono associati dei livelli di intensità variabili tra 1 e 10 che, opportunamente sommati, forniscono le 10 classi di intensità che vanno da I (molto bassa) a X (molto alta) indicate in Tabella 2 e Fig. 7.

DETERMINAZIONE DELL'INTENSITÀ DELLA FRANA

L'intensità della frana è stata valutata attraverso una matrice costituita da diversi parametri che caratterizzano la frana ed esprimono la sua intensità tra cui il volume, la velocità, *run out*, l'altezza dell'area coinvolta, la deformazione e la tipologia. Ad ogni parametro è assegnato un valore tra 1 e 10 in riferimento al suo all'intervallo e alla classe di appartenenza (Tab. 3). Questi valori sono poi sommati e opportunamente suddivisi in appositi intervalli. Ad ogni intervallo è associata una magnitudo variabile tra 1 e 10 (Tab. 4) ed un'intensità che va da molto bassa (I) a molto alta (X).

STIMA DELL'INTEGRITÀ FISICA E DELLA FUNZIONALITÀ INTRINSECA

Solo gli elementi all'interno delle tre aree inondabili (T=30, 200 and 500 anni) e del movimento di massa sono sottoposti a caratterizzazione funzionale. Per ognuno di questi elementi la vulnerabilità fisica è valutata utilizzando l'Equazione 1 modificata in funzione delle

variables are calculated on right and left bank choosing the greater of the two. To each parameter is assigned a value (score) between 1 and 10 as a function of its specific interval and class. Then these numbers are added and subdivided into some intervals. Each interval has an associated magnitude varying from 1 to 10 and an intensity varying from very low (I) to extremely high (X) as show in Table 2 and Fig. 7.

LANDSLIDE INTENSITY ASSES

The magnitude is measured by means of a matrix constituted by various parameters which characterize the landslide and express its intensity including: volume, velocity, run out, depth area involved, deformation and typology. Every parameter is assigned a number / score between 1 and 10 as a function of its specific interval and class (Tab. 3). These numbers are then added and subdivided into opportune intervals. Each interval has an associated magnitude varying from 1 a 10 (Tab. 4) and an intensity varying from very low (I) to extremely high (X).

PHYSICAL INTEGRITY AND INTRINSIC FUNCTIONALITY ASSESSMENT

Only the elements within the three flooded areas (T=30, 200 and 500 years) and within the landslide are subjected to functional characterization. For each of these elements, the physical vulnerability is evaluated using equation 1 changed according to its physical and

Tab. 5 - Vulnerabilità fisica e funzionalità intrinseca ed intensità relativa ad alcuni elementi coinvolti nell'inondazione
- *Physical vulnerability and intrinsic functionality for some characteristic elements of the study involved into the inundation*

| Type | Category | Vulnerability | Intrinsic functionality | Event intensity |
|------------|----------|---------------|-------------------------|-----------------|
| Roads | A | 0.191 | 0.265 | 3 |
| Industries | B | 0.235 | 0.30 | 5 |
| Buildings | B | 0.33 | 0.611 | 5 |

| Type | Category | Vulnerability | Intrinsic functionality |
|--------------------------------------|----------|---------------|-------------------------|
| Roads | A | 0.89 | 0.99 |
| Residential district or census areas | B | 0.74 | 0.98 |

Tab.6 - Vulnerabilità fisica e funzionalità intrinseca relativa ad alcuni elementi coinvolti nella frana
- *Physical vulnerability and intrinsic functionality for some characteristic elements of the study involved into the landslide*

Tab. 7 - Numero di elementi coinvolti nel disastro e indice globale I per i tre eventi di inondazione considerati
- *Numer of elements involved in the disaster and global index I for the three inundation events considered*

| Involved elements | T = 30 years | T = 200 years | T = 500 years |
|-------------------|-----------------|------------------|------------------|
| points | 6 | 19 | 25 |
| lines | 31 | 47 | 54 |
| areas | 27 | 29 | 29 |
| | $I_{30} = 0.42$ | $I_{200} = 0.43$ | $I_{500} = 0.57$ |

sue caratteristiche fisiche e socio-economiche (PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii*, 2010; SDAO *et alii*, 2010); mentre per la funzionalità intrinseca si fa riferimento all'Equazione 2 (Tabb. 5 e 6).

Riguardo l'evento di inondazione, per l'area considerata, la vulnerabilità fisica varia tra 0.031 e 0.697 per gli elementi lineari, tra 0.031 a 0.419 per gli elementi puntuali e, infine, tra 0.046 a 0.585 per quelli areali. Invece, la funzionalità intrinseca assume valori tra 0.201 e 0.617 per gli elementi puntuali, tra 0.201 e 0.979 per gli elementi lineari e tra 0.203 e 0.856 per quelli areali.

Invece, per l'evento franoso, la vulnerabilità fisica varia tra 0.44 e 0.89 per gli elementi lineari ed è pari a 0.74 per quelli areali. Invece, la funzionalità intrinseca assume valori tra 0.72 e 0.99 per gli elementi lineari ed è pari a 0.98 per quelli areali.

VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISTEMICA

Nell'analisi di vulnerabilità sistemica, i dati di input provengono dai valori di funzionalità intrinseca degli elementi spaziali del sistema. Ciò accade per ciascuno dei periodi di ritorno considerati. Per una migliore comprensione, si indicano con x_{it}^0 , x_{it} e I_T rispettivamente il livello di funzionalità intrinseca dell'elemento i-esimo, il livello di integrità funzionale dell'elemento i-esimo e l'indice globale di funzionalità I corrispondenti al periodo di ritorno T e all'evento franoso considerato.

RISULTATI

Rispetto all'evento di inondazione, in generale l'indice globale I non subisce significative variazioni passando dallo scenario relativo alla piena con tempo di ritorno di 30 anni a quello con tempo di ritorno di 500 anni. Questo perché i contorni delle aree inondabili dei tre eventi di piena ipotizzati risultano, in gran parte, coincidenti. L'indice varia tra un minimo di 0.42 ed un massimo di 0.57. I risultati sono sintetizzati nella Tabella 7.

Per quanto riguarda l'evento di massa, nel caso di studio, 26 elementi territoriali risultano direttamente coinvolti nel disastro: 6 elementi

socio-economic characteristics (PASCALE *et alii*, 2009; PASCALE *et alii*, 2010; SDAO *et alii*, 2010) while the intrinsic functionality is referenced to the equation 2 (Tabs. 5 and 6).

Regarding the event of flooding, the area considered, the physical vulnerability varies between 0031 and 0697 for linear elements, between 0031 to 0419 for items on time and, finally, between 0046 to 0585 for those ranges. Instead, the intrinsic feature takes values between 0201 and 0617 for items on time, between 0201 and 0979 for linear elements and between 0203 and 0856 for those ranges.

Instead, for the landslides, vulnerability varies between 0.44 and 0.89 physics for linear elements and is equal to 0.74 for those ranges. Instead, the intrinsic feature takes values between 0.72 and 0.99 for linear elements and is outcast 0.98 for those ranges.

SYSTEMIC VULNERABILITY ASSESSMENT

In the analysis of systemic vulnerabilities, the input data come from the values of intrinsic functionality values of the spatial elements in the system. This happens for each return period concerned. For better understanding, x_{it}^0 , x_{it} and I_T indicate respectively the level of intrinsic functionality of i-th element, the level of functional integrity of the i-th element and the global index of functionality corresponding to the return period T and to the landslide event.

RESULTS

About the inundation events, generally the global index I don't present significant changes from the scenario with T = 30 years to the scenario with T = 500 years. This according to the perimeter of inundated areas: in fact it is about the same for the three return periods. The index varies from a minimum of 0.42 to a maximum of 0.57. The results are shown in the Table 7.

About the lanslide, there are 26 territorial elements directly involved in the disaster: 6 areas, 6 points and 20 lines. All the consid-

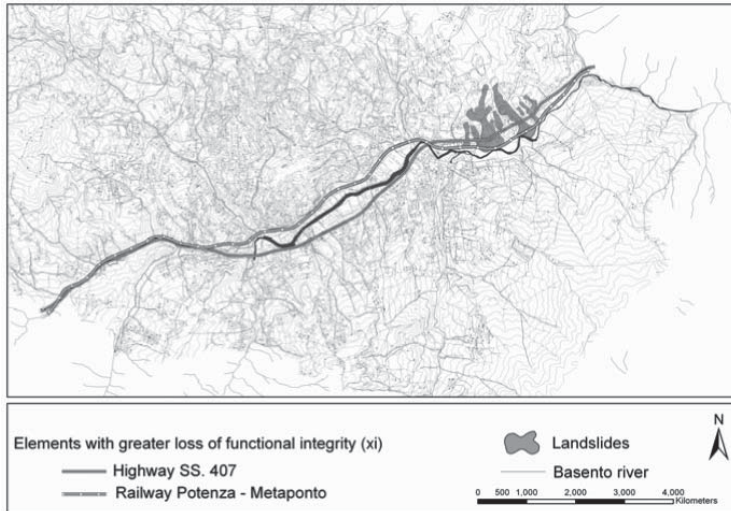


Fig. 8 - Città di Potenza ed elementi con una maggiore perdita di integrità funzionale (x_i)
 - Potenza city and element with greater loss of functional integrity (x_i)

areali, 6 puntuali e 20 lineari. Tutti gli elementi considerati presentano una perdita di funzionalità almeno del 10% e, pertanto, non trascurabile.

Tutti gli elementi mostrano una perdita di integrità funzionale maggiore del 20%: si tratta di strade urbane ed extraurbane, di linee ferroviarie vicine o direttamente coinvolte nello scenario considerato e, pertanto, con valori nulli sia della funzionalità (x_i^0) che della funzionalità intrinseca (x_i). Sei sono le strade a presentare una maggiore riduzione della funzionalità che della funzionalità intrinseca (Fig. 8). Questa riduzione dipende dal basso valore della funzionalità delle strade e non dalla perdita di funzionalità intrinseca.

L'indice globale di perdita funzionale è di 0.87.

Alla luce dei risultati ottenuti attraverso la procedura di analisi della vulnerabilità sistemica proposta, è stato possibile individuare gli elementi che maggiormente influenzano la funzionalità del sistema territoriale. Si tratta, nello specifico, della S.S. 407 Basentana e della linea ferroviaria Napoli-Taranto.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro descrive un approccio per la stima delle conseguenze indotte da eventi estremi, quali quelli indotti dalla combinazione di frane ed inondazioni, attraverso un modello territoriale costruito su una rete di influenze e una procedura di valutazione della vulnerabilità sistemica.

Di particolare importanza è il concetto di vulnerabilità qui presentato, dal momento che essa non è più considerata come semplice caratteristica di un singolo elemento ma, associata ad un complesso sistema territoriale.

Il principale scopo della procedura proposta è quello di fornire un supporto alla pianificazione territoriale sia nell'analisi delle conseguenze che frane ed inondazioni possono avere su un complesso sistema territoriale sia nella definizione di priorità di intervento. Gli interventi che dovrebbero avere maggiore priorità sono quelli che presentano valori più alti dell'integrità funzionale x_i , conseguentemente,

ered elements show a functional loss of at least 10% and, therefore, not negligible.

Tutti gli linear elements have a loss of functional integrity greater than 20%: these are urban streets, away and railway near or directly involved into the scenario considered and, therefore, with null values of both the functionality (x_i^0) of both the intrinsic functionality (x_i). Six roads have more intrinsic functionality and functional integrity reduction (Fig. 8). This reduction depends on the low value of functionality of the streets and it is not due to a loss of intrinsic functionality, but rather to a loss of functional integrity of the roads connected to them.

The global index of functionality loss is 0.87.

The results obtained using the systemic vulnerability procedure proposed, show what elements suffer the greatest functionality of territorial system. There are the S.S. 407 Basentana street and the railway Napoli-Taranto.

CONCLUSION

This work has put forward an approach for the estimation of the consequences of landslide and flood events drawn up by means of the utilization of a territorial model based on a network of influences and an estimation procedure of systemic vulnerability.

The concept of vulnerability, considered no longer simply as the characteristic of a single element but as associated with a complex territorial system is of fundamental importance.

The main aim of the proposed procedure is to act as a support in planning decisions, in analyses of the consequences of landslide and flood events on complex territorial systems, and in defining intervention priorities. Intervention elements which should be given priority are those with higher values of functional integrity x_i ; moreover, the proposed procedure permits intervention (structural or management) on the elements which suffer the greatest systemic vulnerability effects.

la procedura proposta consente di mirare gli interventi agli elementi che maggiormente risentono degli effetti della vulnerabilità sistemica.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'Autorità Interregionale di Bacino della Basilicata per i dati resi disponibili.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AA.VV. ADVISORY BOARD ON THE BUILT ENVIRONMENT, COMMISSION ON ENGINEERING TECHNICAL SYSTEMS AND NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1983) - *Report on a Workshop on Mitigation Strategies for Communities Prone to Multiple Natural Hazards*. Snowmass, Colorado 6-8 July 1983. National Academic Press, Washington D.C., 1-22, 1983.
- BASIN AUTHORITY OF BASILICATA P.A.I. (2009) - *Piano Stralcio per la Difesa dal rischio Idrogeologico*.
- CANIANI D., PASCALE S., SDAO F. & SOLE A. (2008) - *Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza*. *Natural Hazards*, **45**: 55-72, Springer Ed..
- EZELL B.C., FARR J.V. & WIESE I. (2000) - *Infrastructure risk analysis model*. *Journal of infrastructure system*, 114-117.
- FERA G. (1991) - *La città antisismica*. Gangemi Editore, Roma
- GALLI M. & GUZZETTI F. (2007) - *Landslide Vulnerability Criteria: A Case Study from Umbria, Central Italy*. *Environmental Management*, **40**: 649-664
- GULLÀ G. & SDAO F. (2001) - *Dissesti prodotti o aggravati dal sisma del 9 settembre 1998 nei territori del Confine calabro-lucano*. Monografia del Gruppo Nazionale Difesa Catastrofi Idrogeologiche, CNR - 112 pp, Rubbettino Ed. srl, Soveria Mannelli (CZ). Pubbl. n. **2121** del catalogo pubblicazioni del GNDICI, CNR.
- DI MAIO C., VASSALLO R., VALLARIO M., PASCALE S. & SDAO F. (2010) - *Structure and kinematics of a landslide in a complex clayey formation of the Italian Southern Apennines*, submitted for *Engineering Geology*, Elsevier Ed.
- HAIMES Y.Y. & JIANG P. (2001) - *Leontief-based model of risk in complex interconnected infrastructures*. *Journal of infrastructure system*, 1-12.
- MINCIARDI R., SACILE R., TARAMASSO A.C., TRASFORINI E. & TRAVERSO S. (2004) - *Valutazione della vulnerabilità di sistemi territoriali complessi soggetti a rischi di origine naturale: il caso della sollecitazione idrologica in Val Roja*. Atti del Convegno VGR 2004 - Valutazione e Gestione del Rischio, Pisa, 19-21 ottobre 2004.
- MINCIARDI R., SACILE R. & TRASFORINI E. (2006) - *Assessing the efficiency and the criticality of the elements belonging to a complex territorial system*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **6**: 21-32.
- PASCALE S., GIOSA L., SDAO F. & SOLE A. (2009) - *Assessment of systemic vulnerability in flood prone areas*. Fourth International Conference on Sustainable Development and Planning, Cyprus, 13-15 May 2009.
- PASCALE S., SDAO F. & SOLE A. (2010) - *A model for assessing the systemic vulnerability in landslide prone areas*. *Nat. Hazards Earth System Science*, **10**: 1575-1590, 2010, DOI:10.5194/nhess-10-1575-2010.
- PERRONE A., IANNUZZI A., LAPENNA V., LORENZO P., PISCITELLI S., RIZZO E. & SDAO F. (2004) - *High-resolution electrical imaging of the Varco d'Izzo earthflow (Southern Italy)*. *Journal of Applied Geophysics*, **56**:17- 29, Elsevier ed. Netherland, DOI: 10.1016/j.jappgeo.2004.03.004.Elsevier ed. Netherland.
- PETRUCCI O. & POLEMIO M. (2003) - *The use of historical data for the characterisation of multiple damaging hydrogeological events*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **3**: 17-30.
- POLEMIO M. & SDAO F. (1996a) - *Rischio di frana indotto dagli eventi di pioggia in Avigliano (Basilicata)*. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, **31**: 23-30, 3 ff., 3 tabb.
- POLEMIO M. & SDAO F. (1996b) - *Landslide hazard and critical rainfall in Southern Italy*. In: *Landslides* (SENNESET K. Ed.), Proceedings of 6th International Symposium on Landslides, 2: 847-852, 6 ff., 1 tab. Trondheim, giugno 1996. - Balkema. Pubbl., Rotterdam (Netherlands).
- POLEMIO M. & SDAO F. (1998) - *Heavy rainfalls and extensive landslides occurred in Basilicata, Southern Italy, in 1976*. Proceedings of 8th Congress of International Association of Engineering Geology and Environment, 1849-1855, 5 ff., 2 tabb. - Vancouver, Canada Settembre 1998, Balkema Ed, Rotterdam. Pubbl. n. 1842 del catalogo del G.N.D.C.I., C.N.R.
- TAMURA H., YAMAMOTO K., TOMIYAMA S. & HATONO I. (2000) - *Modeling and analysis of decision making problem for mitigating natural disaster risks*. *European Journal of Operational Research* **122**: 461-468.
- SDAO F., SIMEONE V. & SPILOTRO G. (1996) - *Influence of rainfalls on the landslides occurred in Basilicata (Italy) in 1973*. Proceedings of the International Conference on Hydrology and Water Resources, New Delhi, Dicembre 1993, SINGH & KUMAR (EDS), vol. 4 "Water Resources Planning and Management": 335-343, 6 ff., 1 tab. - Kluwer Ac. Publ.
- SDAO F. & SIMEONE V. (2007) - *Mass movements affecting Goddess Mefitis sanctuary in Rossano di Vaglio (Basilicata, southern Italy)*. *Journal of Cultural Heritage*. Elsevier Ed.
- SDAO F., SOLE A., SIVERTUN A., ALBANO R., GIOSA L. & PASCALE S. (2010) - *Implementazione in ambiente GIS di un modello di valutazione della vulnerabilità sistemica*. Sesta Conferenza Nazionale in Informatica e Pianificazione Urbana e Territoriale (INPUT 2010)

Received January 2010 - Accepted July 2010