

PAOLO GIACOMELLI*,
SIMONE STERLACCHINI**,
MATTIA DE AMICIS***

* *Dipartimento di Economia e Politica Agraria, Agro-alimentare ed Ambientale, Università degli Studi di Milano*
e-mail: paolo.giacomelli@unimi.it

** *IDPA-CNR, Milano*

*** *Dipartimento Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Milano-Bicocca.*
e-mail: mattia.deamicis@unimib.it

Parole chiave: *incertezza, funzione di utilità attesa, causa-effetto, danni diretti ed indiretti*

La valutazione del rischio di frana¹

In the Environmental risk evaluation, the most important problem are: to attempt to anticipate the risks, to assess the relationships between causes and effects and to balance the benefits with the costs associated to the control of risks. Risk assessment is mixed with risk management, which is in effect a different area of human behavior.

According to mainstream economics refer risk to individual behavior, the Expected utility function (EUF) incorporates risk: risk aversion is strictly individual, it's necessary a good knowledge of probability occurrence and risk is managed through decision. But, when we use multidimensional data to describe the risk, EUF seems inadequate: environmental risks are complex, and so individual can not manage them. The main consequence is that environmental risk is to be considered exogenous with respect to individual behavior. Environmental economics assesses risks on the basis of the relationship: causes lead to effects. Effects have to be evaluated as physical/technical ones, afterwards it is possible to assess their economic value.

1. Introduzione

I movimenti franosi sono oggetto di analisi, di controlli, di tentativi di previsione da tempi immemorabili. La ricerca scientifica e tecnologica ha sostenuto con vigore lo sviluppo di attività volte ad individuare la pericolosità dei potenziali fenomeni franosi, definendone le caratteristiche, i possibili movimenti, i materiali. Un ambito specifico si è orientato a studiare i fattori causali che provocano la frana. Il problema delle frane, in tutte le zone del nostro paese, è noto per la diffusione in particolare nelle aree rurali di collina e montagna.

Più recentemente l'attenzione ha iniziato a focalizzarsi sugli effetti dannosi al territorio, cercando di individuare, attraverso analisi sull'uso del suolo, i beni fisici potenzialmente danneggiati dal movimento franoso.

È evidente come la presenza umana sul territorio possa, nel caso di evento di questo tipo, essere influenzata in modo complesso, sia in forma diretta che indiretta, sia sui beni fisici che sulle attività economiche svolte, sia con riferimento alle condizioni di sicurezza fisica delle persone; le conseguenze inoltre possono avere

¹ Questo lavoro è stato finanziato nell'ambito del progetto europeo "Alarm", "Assessment of Landslides Risk and Mitigation in Mountain Areas" (5° Programma Quadro dell'Unione Europea). Il lavoro è stato discusso e sviluppato in comune dagli autori. P. Giacomelli ha curato la stesura del paragrafo 2, S. Sterlacchini i paragrafi 1 e 4, M. De Amicis il paragrafo 3.

una durata temporale che si propaga ben oltre il fenomeno e gli eventuali interventi di recupero successivi.

Il quadro di riferimento istituzionale di queste problematiche è basato su forme legislative non sempre coerenti, con differenti approcci nei diversi paesi dell'Unione Europea, e con modelli di gestione del rischio impostati sulla prevenzione senza limitazioni e senza valutazione degli impatti. Questo contesto ha spinto verso la necessità di studiare il fenomeno in un contesto uniforme e finalizzato a comprendere gli effetti sulle attività umane derivanti da potenziali fenomeni franosi.

Questo primo lavoro sull'argomento vuole inquadrare le problematiche di carattere economico e valutativo sul rischio nel contesto ambientale, descrivere gli approcci che le scienze della terra hanno sviluppato sui rischi di frana, al fine di individuare un primo livello di integrazione tra i due diversi percorsi.

Lo sviluppo di un sistema sostenibile di gestione del rischio, in particolare nelle aree rurali, appare di primario rilievo ma deve essere preceduto da un corretto sistema di valutazione.

2. Economia e valutazione del rischio ambientale

L'analisi, la valutazione e la gestione del rischio derivano dalla presenza dell'incertezza, fattore caratteristico di tutta l'esistenza umana.

L'approccio tipico dell'economia a questo problema riguarda i comportamenti di scelta dell'individuo in condizioni di incertezza, il quale (Varian, 1993), sulla base degli stati di natura prevedibili, individua una distribuzione di probabilità che gli consente dei comportamenti condizionati, e cioè dipendenti dall'avverarsi di determinati eventi. In particolare il paradigma neoclassico analizza il rischio con specifico riferimento al comportamento del consumatore ed in quanto rappresenta la modalità con cui lo stesso affronta le situazioni d'incertezza.

Nel campo dei rischi ambientali, bisogna preliminarmente osservare che si riconoscono comportamenti individuali volti a gestire tali rischi (Starr, 1969), attraverso forme di assicurazione che, seppur sotto forma di mercato incompleto, caratterizzano molti beni ambientali (Marshall, 1976).

Si parla, in questo caso, di rischio ambientale endogeno, in quanto viene in qualche forma gestito; la posizione dell'esternalità, intesa come effetto subito dalla collettività e da singoli, non va sovrapposta a questa situazione i cui presupposti risultano sostanzialmente diversi.

Seppur già noto, il percorso teorico che conduce formalmente all'introduzione del rischio nel contesto del comportamento individuale può essere opportunamente ricordato, con modalità propedeutiche alla prospettiva applicativa.

La funzione di utilità del consumatore introduce, nella individuazione delle scelte da operare in condizioni d'incertezza, diverse situazioni possibili (chiamate stati di natura), che alternativamente si possono avverare. La decisione ed il livello di consumo dipendono, in questo nuovo contesto, dalla probabilità con cui le diverse situazioni si verifichino nella pratica. Definite 1 e 2 le due situazioni alter-

native, viene indicata con P_1 e P_2 la probabilità che 1 e 2 si verifichino, inoltre $P_2 = 1 - P_1$.

I livelli di consumo, nella rispettive situazioni, vengono detti C_1 e C_2 .

In questa situazione si definisce *valore atteso* la seguente:

$$u(C_1;C_2;P_1;P_2) = P_1C_1 + P_2C_2 \quad (1)$$

che rappresenta il livello medio di consumo.

La funzione di utilità può essere espressa convenientemente come somma ponderata di una funzione di consumo nei due stati $u(C_1)$ e $u(C_2)$, nella quale i pesi sono le probabilità. Se i due beni presi in considerazione sono perfetti sostituti, è possibile esprimere l'utilità media, o utilità attesa, del piano di consumo dei due beni:

$$P_1u(C_1) + P_2u(C_2) \quad (2)$$

Questa espressione, come noto, viene chiamata funzione di utilità attesa o funzione di utilità di Von Neumann-Morgenstern.

Sotto il profilo teorico si osserva che una trasformazione monotona dell'utilità attesa continuerà a possedere la proprietà dell'utilità. Normalmente si può pensare che una trasformazione lineare positiva mantenga ragionevolezza poiché, alla fine, solo uno dei piani condizionati di consumo si realizzerà effettivamente.

Inoltre viene introdotta, nell'analisi del rischio, anche l'ipotesi che, in condizioni d'incertezza, si verifichi una situazione tale per cui i consumi avvengono separatamente nei diversi stati di natura; in altri termini che le scelte di consumo previste in uno stato non influenzino quelle negli altri stati. Introducendo un terzo livello di consumi C_3 e nell'ipotesi che venga soddisfatta l'ipotesi di indipendenza tra i diversi eventi (stati di natura), la funzione di utilità assume la seguente forma:

$$U(C_1;C_2;C_3) = P_1u(C_1) + P_2u(C_2) + P_3u(C_3) \quad (3)$$

La posizione individuale rispetto al rischio consente di esprimere il grado di avversione o propensione al rischio stesso.

Le principali aree applicative di questo approccio riguardano, come noto, la domanda di assicurazioni e la diversificazione dei rischi.

Un diverso percorso per trattare la scelta in condizioni di incertezza consiste nel descrivere le distribuzioni di probabilità tramite alcuni parametri (ad esempio nel modello "media-varianza" questi, insieme allo scarto quadratico medio, sono i parametri impiegati), e di valutare le decisioni sulla base di questi ultimi.

In questo caso l'applicazione avviene normalmente sui mercati finanziari per definire le decisioni d'investimento.

Come ripetutamente osservato da diversi autori (Machina, 1982; Loomes e Sudgen, 1987; Starmer, 1998) le applicazioni di questi approcci mostrano una serie

di limiti qualora si analizzino le decisioni in determinate condizioni. Ad esempio, quando il risultato di una decisione può essere valutato sulla base di differenti scale, multidimensionali, l'impiego dell'utilità attesa diventa problematico.

Un importante tentativo per adottare lo schema teorico dell'utilità attesa è legato al caso di situazioni nelle quali la scala di misura dell'utilità è basata sulla vita umana e sulla salute. È disponibile una serie di metodi, proposti per dedurre le utilità, ed uno di questi, basato sul principio dell'utilità attesa, è noto sotto il nome di *standard gamble technique* (Torrance, 1986). L'approccio è basato su un sistema ad intervista che porta l'intervistato ad esprimere, attraverso approssimazioni successive, l'utilità relativa al proprio stato di salute rispetto a quelle, teoriche, della salute perfetta e della morte. È stata anche affermata la validità del metodo (Norton, 1984) come strumento economico impiegato nella valutazione d'impatto ambientale, nel caso di una centrale termica e delle relative emissioni di anidride solforosa in atmosfera.

Sarebbe comunque fuorviante sostenere che l'impiego di questi metodi può consentire l'individuazione di soluzioni ottimali, intese come soluzioni non equivoche. In particolare le problematiche dell'economia ambientale sembrano difficilmente convogliabili entro uno schema risolutivo di questo tipo (Starmer, 1998).

Infatti è stato ripetutamente osservato (Laffont, 1995; Chapman e Hariharan, 1996; Croker e Shogren, 1999) come, in relazione a rischi di carattere ambientale, gli individui preferiscano programmi collettivi di sicurezza, nella generalità dei casi, in sostituzione a comportamenti di autoprotezione individuale. Anche decisioni politiche di volte a minimizzare i costi individuali tendono, analogamente, ad alterare gli incentivi individuali di avversione al rischio e quindi di autoprotezione.

L'economia del rischio tende a mettere in evidenza i comportamenti nei quali, anche di fronte a rischi ambientali, l'individuo frequentemente assume decisioni rilevanti in merito al rischio stesso, con un trasferimento del potenziale danno ambientale da esternalità e rischio endogeno.

In ogni caso deve essere sottolineato il fatto che l'economia del rischio è orientata ad analizzare e definire i comportamenti individuali in presenza di una situazione potenzialmente negativa, della quale si definiscono contorni, caratteristiche, probabilità di accadimento.

La valutazione del rischio si pone, in linea di principio, su un piano diverso, si potrebbe definire anche precedente, all'economia.

Infatti la valutazione dei rischi ambientali sconta un presupposto fondamentale che ritiene sostanzialmente esogeno, estraneo alla possibilità di controllo da parte degli individui (National Academy of Sciences, 1983; Breyers, 1993), il pericolo. Solo successivamente, attraverso la gestione dei rischi stessi, avviene l'operazione di internalizzazione, di endogenizzazione. La gestione dei rischi ambientali, in relazione alle dimensioni ed alla portata degli stessi, non può essere di competenza individuale, ma risulta un'attività in capo alla collettività nel suo complesso.

Il dibattito appare comunque aperto, sottolineando come risulti necessario prendere in considerazione sia le modalità attraverso le quali singoli individui ri-

spondono al rischio ambientale, sia i comportamenti pubblici derivanti dalle scelte politiche di gestione del rischio (Viscusi, 1992).

La valutazione del rischio ambientale, per ciò che riguarda la fase economica, di monetizzazione, può essere realizzata a partire da differenti approcci, o quanto meno da differenti metodologie (USEPA, 2000), più o meno largamente e recentemente impiegati².

A fondamento di ogni valutazione economica va comunque riconosciuta la presenza di una base informativa indispensabile; in questo quadro il paradigma dominante nelle analisi tecniche volte alla valutazione del rischio (Calow, 1998) distingue tra pericolosità (hazard), intesa come il potenziale capace di causare danni, e rischio (risk), il quale rappresenta la verosimiglianza, la probabilità che il potenziale sopra indicato si realizzi, diventi effettivo.

La valutazione del rischio adotta, nell'approccio più frequentemente adottato, il cosiddetto "modello dose-risposta" (Pearce, 1998) anche se va osservato che l'applicazione di questo modello logico è storicamente collegata al contesto biologico (per ciò che riguarda la risposta) ed all'inquinamento (per ciò che riguarda la dose). Ma il principio dose-risposta può essere opportunamente riletto utilizzando una chiave di lettura valutativa più generale, del tipo causa-effetto (Poelli, 2000)³, che può trovare logica applicazione nel contesto delle problematiche legate agli eventi franosi.

L'espressione tipica della funzione dose-risposta (Pearce, 1998), che esprime la relazione tra quantità di dose e conseguenze prodotte, deriva da relazioni funzionali più ampie, basate sulla valutazione della salute umana. In particolare, quando si cerca di valutare il rischio si assume a riferimento la variazione di salute H , si assume che questa avvenga in relazione ad una variazione delle variabili rilevanti:

$$\Delta H = f(\Delta A, \Delta S, \Delta Y, \Delta Q, \Delta E) \quad (4)$$

dove:

A = età

S = fattore fumo

Y = reddito disponibile

Q = altri fattori d'influenza

E = qualità ambientale

² I diversi approcci che possono essere adottati per la valutazione del rischio ambientale, secondo l'atteggiamento, fondato su grande pragmatismo, dell'Agenzia americana, sono: l'analisi costi-benefici, l'analisi costi-efficacia, l'analisi "dell'economia ecologica" (che comprende lo sviluppo sostenibile, la capacità di carico, il ciclo di vita, l'economia stazionaria), l'analisi "dell'economia ambientale" (che comprende valutazione del valore d'uso monetario tramite valutazione contingente, costi di viaggio, prezzi edonici), l'analisi economica "risk-based" (basata su logiche di simulazione, peraltro applicabili in ciascuno degli ambiti precedenti).

³ È opportuno rammentare che il concetto di rischio si riferisce alla verosimiglianza, alla probabilità che un pericolo si concretizzi, mentre la sua valutazione riguarda gli effetti derivanti da tale causa. Pertanto non va confusa la valutazione del rischio con l'identificazione del pericolo (che in letteratura anglosassone viene definito hazard) e la successiva valutazione della pericolosità, in quanto questa si riferisce alle dimensioni del potenziale che può causare effetto.

Volendo riprendere in modo particolare lo schema di valutazione per la variazione della qualità ambientale, è evidente come sia necessario, nel contesto dei rischi di frana, individuare in modo univoco la pericolosità, seguendo uno schema estimativo generalmente accettato da valutatori italiani e stranieri (tra gli altri Di Cocco, 1960; Stewart, 1991; Guatri, 1998), la pericolosità e la sua valutazione possono essere considerate "informazioni elementari", di base, propedeutiche alla vera e propria valutazione del rischio, ma assolutamente indispensabili.

L'ambito delle valutazioni ambientali è infatti caratterizzato da un grado di complessità normalmente così elevato da impedire la possibilità di adottare schemi valutativi di tipo sintetico: la multidimensionalità vincola la valutazione a prendere in considerazione tutte le informazioni di base disponibili.

Questo percorso consente di stimare in forma unitaria il rischio, mentre il gradino successivo della valutazione del rischio ambientale è legato alla identificazione dello "stock e flussi a rischio", intendendo con questa espressione la misura dei soggetti, attività, beni esposti alla "dose".

La valutazione economico-estimativa necessita una stima del valore di mercato, di costo, d'uso dei diversi elementi che vengono potenzialmente coinvolti dal fenomeno franoso. La decisione circa l'opportunità di utilizzare una di queste espressioni del valore sarà collegata alla tipologia della situazione. Inoltre la comprensione del contesto economico-sociale del territorio appare indispensabile per poter correttamente effettuare la valutazione del rischio.

Il problema della gestione del rischio ambientale (che in termini generali riguarda la possibilità di ridurre, limitare, o rimuovere il pericolo) appare, come si era in precedenza accennato, fortemente legato alla valutazione, in quanto logicamente successivo a tale fase. La valutazione del rischio dovrebbe essere sviluppata in termini scientifici, oggettivi (sulla base delle conoscenze disponibili), mentre la gestione dovrebbe dipendere da giudizi e considerazioni sociali e politiche.

Questa distinzione (tra valutazione e gestione) non risulta sempre chiara: si osservano situazioni nelle quali la gestione avviene prima della valutazione, altre nelle quali la definizione di soglie (ad esempio per sostanze inquinanti) di protezione non viene effettuata a partire da specifiche conoscenze.

Infine, poiché normalmente la gestione porta all'allocazione di risorse finanziarie (che sono normalmente disponibili in quantità limitata), le decisioni relative si confrontano anche con usi alternativi delle risorse stesse.

La valutazione del rischio può essere considerata antitetica all'adozione, nella fase di gestione, del cosiddetto "principio della precauzione". L'attuale definizione di questo concetto appare ancora oggi insufficiente (O'Riordan e Cameron, 1994), poiché se ne riconoscono diversi usi. In particolare sembra utile sottolineare come un'importante applicazione di questo concetto sia associata al riconoscimento che l'analisi scientifica, stante la complessità delle problematiche ambientali, lasci spazio sistematicamente a numerosi ambiti d'incertezza.

Di conseguenza la salute umana o, più in generale, il livello di sicurezza, dipenderebbe da giudizi soggettivi e pertanto la gestione del rischio dovrebbe dipendere solo dall'adozione del principio precauzionale e non dalla valutazione del rischio.

3. L'approccio della ricerca geomorfologica alla valutazione del rischio

Metodologie e tecniche sono state sviluppate a più riprese per la valutazione dei rischi naturali (frane, terremoti, alluvioni, eruzioni vulcaniche, valanghe, terremoti, incendi, ecc.), dei rischi legati all'azione antropica (inquinamento dei terreni, delle acque superficiali e/o profonde e dell'atmosfera, incidenti, esplosioni, rottura o cedimento di opere strutturali, investimenti economici, ecc.) oppure dei rischi naturali ma indotti dall'uomo (frammenti a seguito di una inefficiente gestione del territorio, alluvionamenti a seguito di un restringimento degli alvei fluviali e/o torrentizi, ecc.).

Spesso è stata proprio la diversa provenienza tecnico-scientifica dei soggetti coinvolti nonché la natura stessa dei fenomeni coinvolti a determinare una confusione a livello terminologico a cui ultimamente si è posto rimedio. La terminologia, infatti, si è progressivamente standardizzata vergendo su alcune definizioni ormai universalmente accettate (Varnes et al. 1984), che consentono di inquadrare secondo uno schema logico il problema.

Fenomeno potenzialmente pericoloso: processo avente una determinata probabilità di accadimento nell'ambito di una certa area in grado di arrecare danni alla popolazione (a singoli individui, a parte e/o all'intera collettività), ai beni, alle proprietà ed alle attività della popolazione, nonché ai servizi e alle risorse allocate nell'ambito territoriale in corso di studio. Superando una visione antropocentrica, si possono considerare fenomeni potenzialmente pericolosi anche quelli che comportano danni a comunità animali o vegetali (deforestazione, desertificazione, prosciugamento dei corsi d'acqua, ecc.).

Pericolosità (Hazard, H): probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente dannoso in un determinato intervallo di tempo e in una certa area: la pericolosità è stata definita in letteratura in vari modi e con diverse accezioni. La definizione più largamente utilizzata in relazioni ai fenomeni naturali è quella proposta da Varnes nel rapporto UNESCO del 1984 (Varnes et al. 1984), secondo cui la pericolosità corrisponde alla probabilità di occorrenza di un fenomeno potenzialmente dannoso in un determinato intervallo di tempo e in una certa area. Questa definizione esprime in modo esplicito il concetto di spazialità e temporalità del fenomeno naturale, e soltanto in modo implicito ma sicuramente insoddisfacente, il concetto di intensità o magnitudo, ovvero la dimensione ed il potere distruttivo del fenomeno stesso.

Per esplicitare questi aspetti alcuni autori (Fell, 1994; Finlay e Fell, 1997) hanno proposto una definizione di pericolosità come prodotto della probabilità di occorrenza di un certo fenomeno in una certa area per la magnitudo (intensità) del fenomeno stesso.

Einstein (1988) introduce un'ulteriore variante alla definizione proposta da Varnes attraverso il concetto di pericolo (*danger*); quest'ultimo serve ad indicare la severità geometrica e meccanica del fenomeno. In questo modo Einstein considera la pericolosità come la probabilità di occorrenza di un pericolo (*danger*) in un certo intervallo di tempo. In tal caso risultano espressi in modo esplicito il concetto di intensità, di temporalità e di spazialità dei fenomeni potenzialmente pericolosi.

Nella pratica comune, la pericolosità viene generalmente espressa in termini di probabilità annuale (o tempo di ritorno) per un fenomeno di una determinata intensità, in una certa area.

In sismica, ad esempio, la pericolosità viene definita in termini di energia rilasciata (magnitudo), area interessata e tempi di ritorno del terremoto. Bisogna però osservare che, a livello pratico, la predizione congiunta di questi parametri risulta spesso impossibile.

Per quanto riguarda i fenomeni franosi occorre osservare come molti modelli previsionali riportati in letteratura si limitano normalmente a definire dove e con quale probabilità un determinato fenomeno può accadere, senza determinare esplicitamente i tempi di ritorno e l'intensità. In tal senso esistono in letteratura pochi tentativi di effettuare una determinazione completa della pericolosità (DRM 1988, 1990; Del Prete et al, 1992; Fell, 1994).

Nella definizione di Varnes, ed in quelle da essa derivate, non è chiaramente espresso il concetto di propagazione del fenomeno, lasciando spazio ad un'ambiguità concettuale. La pericolosità non deve limitarsi a definire, come spesso accade, la probabilità di innesco del fenomeno, ma deve anche esprimere la probabilità che il fenomeno raggiunga un determinato punto dello spazio lungo la possibile direzione di propagazione del fenomeno.

Elemento a rischio (Element at Risk, E): popolazione, attività e beni, proprietà, servizi e risorse allocate nel territorio esposto al rischio (Varnes et al., 1984).

Esposizione al rischio (Exposition, E_s): probabilità che un certo elemento sia esposto all'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso.

In letteratura il concetto di esposizione per i fenomeni naturali non è stato formalizzato in modo sistematico. Si propone pertanto la definizione sopra riportata. Analogamente può essere intesa come la probabilità che un elemento sia soggetto ad una certa pericolosità.

Per i fenomeni di origine antropica l'esposizione è spesso definita in modo concettualmente diverso. Nella valutazione dell'esposizione ad un contaminante, per esempio, essa esprime la concentrazione di sostanza che viene assunta dall'elemento esposto in un certo intervallo di tempo. In questo modo, però, vengono accorpati al concetto di esposizione anche i concetti di intensità del fenomeno e di vulnerabilità dell'elemento esposto.

L'esposizione al rischio è una caratteristica degli elementi a rischio che spesso non viene considerata in modo esplicito.

Nelle diverse discipline il concetto di esposizione è trattato in modo differente. In tossicologia, ad esempio, si intende per esposizione la concentrazione di una determinata sostanza che può essere assimilata in un certo intervallo di tempo.

In generale, l'esposizione si riferisce a quanto e come un certo fenomeno interagisce con gli elementi a rischio, ed è pertanto in funzione sia delle caratteristiche proprie dell'elemento, sia dell'intensità con cui l'elemento interagisce con il fenomeno potenzialmente pericoloso.

Per quanto riguarda i fenomeni naturali, l'esposizione è legata essenzialmente alla mobilità/staticità degli elementi a rischio: ogni elemento infatti è caratterizzato

da un'esposizione al rischio in ogni punto dello spazio in funzione del tempo trascorso in quel punto.

Si intuisce immediatamente la difficoltà di valutazione dell'esposizione per quegli elementi (automobili, persone, ecc.) che sono in continuo movimento.

In termini probabilistici l'esposizione può essere vista come la probabilità che un elemento si trovi nel punto x,y al tempo t , e coincide di fatto con la sua mobilità:

$$E_s = p(E=x,y) * p(E=t) \quad (5)$$

ovvero la probabilità che l'elemento (E) si trovi nel punto x,y al tempo t .

Per esprimere la probabilità è necessario riferirsi ad un certo intervallo temporale. Comunemente ci si riferisce a probabilità annue (da cui il tempo di ritorno in anni), espresse come la probabilità che succeda "qualcosa" nell'arco dell'anno. Diversamente si possono calcolare probabilità mensili, giornaliere, ecc.

Nel caso di oggetti immobili l'esposizione nel punto x,y diventa uguale ad 1, perché l'oggetto non ha la possibilità di sottrarsi al fenomeno pericoloso ed è sempre esposto al rischio esistente. Per la valutazione dell'esposizione di vari elementi sul territorio risulta utile distinguere il tipo di distribuzione del fenomeno (puntuale o areale) ed il tipo di distribuzione degli elementi sul territorio (puntuale, lineare, areale).

Nel caso di elementi che hanno la tendenza a sostare per un certo intervallo di tempo nel punto x , l'esposizione è legata sostanzialmente alla percentuale di tempo trascorso in quel punto rispetto al tempo di riferimento. La scelta dell'intervallo di tempo è molto importante perché l'esposizione dipende dalla distribuzione temporale degli eventi e degli elementi a rischio. Qualora un oggetto mobile abbia un comportamento non costante nel tempo, ovvero tenda a passare tempi maggiori o minori in un luogo (ad esempio, durante l'estate passa più tempo in montagna rispetto al resto dell'anno) l'esposizione dell'oggetto dovrebbe tenere in considerazione questa particolare condizione rispetto alla variabilità della pericolosità nello stesso intervallo di tempo (ad esempio, le frane alpine sono più probabili in estate che in inverno). In quest'ottica la definizione dell'esposizione annuale può essere incompleta.

Nel caso di oggetti in movimento l'esposizione è legata alla velocità con cui gli oggetti passano per il punto nel tempo di riferimento. Per calcolare l'esposizione di un elemento in un'area e non in un punto è necessario, almeno da un punto di vista concettuale, calcolare l'integrale dell'esposizione nei diversi punti.

Nel caso in cui il fenomeno pericoloso non abbia una cinematica lenta oppure sia già avvenuto (massi che cadono o che sono già caduti in mezzo ad una strada), l'esposizione degli elementi mobili sarà influenzata dalla reazione dell'elemento al pericolo (fuga, deviazione, arresto, ecc.). Questa reazione è influenzata anche dalla visibilità del fenomeno, dalla reattività dell'elemento a rischio, dalla presenza di vie di fuga, ecc. Queste due ultime caratteristiche sono parte della *vulnerabilità* dell'elemento. Questo significa che l'esposizione è funzione della vulnerabilità.

In una trattazione probabilistica bisognerà pertanto valutare la distribuzione delle singole esposizioni.

È evidente altresì che l'esposizione così definita non si annulla praticamente mai. Anche nelle zone nelle quali non ci sono pericoli gli oggetti immobili avranno esposizione uguale ad 1 e quelli mobili avranno esposizione variabile in funzione dei loro spostamenti.

Questo concetto sembrerebbe apparentemente contraddittorio (come è possibile che un oggetto statico in pianura sia "esposto" al rischio di frana con esposizione uguale ad 1?), ma, coerentemente con le definizioni date nel presente documento, non lo è.

Essendo il rischio specifico il prodotto di pericolosità, esposizione e vulnerabilità, laddove non c'è pericolosità questo si annulla a prescindere dal fatto che un edificio sia caratterizzato da una esposizione o meno.

La valutazione dell'esposizione, del valore degli elementi e della vulnerabilità è d'altronde del tutto superflua laddove la pericolosità è nulla. In una procedura di valutazione del rischio si parte dal riconoscimento della pericolosità; laddove il livello di pericolosità è inferiore ad una soglia minima oltre la quale è trascurabile (esempio, limite di massimo espandimento), non risulta necessario procedere oltre definendo esposizione, valore degli elementi e vulnerabilità.

In letteratura sono stati proposti alcuni metodi che, seppur non sempre esplicitamente, permettono una valutazione dell'esposizione.

Il Rockfall Hazard Rating System (RHRS, Pierson, 1991) è stato elaborato per la sicurezza del traffico stradale in relazione al pericolo di crolli. I parametri fondamentali per la valutazione del rischio specifico sono 9: altezza della scarpata, efficacia dei valli paramassi esistenti, tempo necessario ad un veicolo per l'attraversamento di un'area a rischio, distanza nicchia/strada in linea d'aria, larghezza della strada, caratteristiche geologiche, volume dei crolli pregressi, presenza d'acqua ed infine, storia delle instabilità da crollo. L'esposizione viene quindi espressa dal tempo necessario ad un veicolo per l'attraversamento.

A tale elenco si potrebbero aggiungere (Crosta e Locatelli, 1999): la distanza necessaria al riconoscimento visivo dell'ostacolo, il tempo di reazione del conducente, il tipo di impatto o di problema (impatto contro mezzo in moto o fermo o urto del mezzo contro un blocco fermo), la velocità media di percorrenza (o limite di velocità imposto), la frequenza di transito, la tipologia del mezzo (automezzo, treno, adibito a merci o persone, ecc.), la direzione di percorrenza che influenza il campo di visibilità (distanza e angolo). Tale elenco evidenzia la difficoltà nella valutazione del rischio per problemi di tipo dinamico, ossia in cui una parte degli elementi a rischio sia "stazionaria" o immobile e una parte sia invece di tipo "transitorio" ossia la cui presenza nell'area a rischio sia temporanea.

Un altro esempio di applicazione di questi concetti in letteratura è offerto da Bunce et al. (1997), in riferimento al rischio da caduta di massi su una superstrada. Gli autori hanno determinato la probabilità che un veicolo venga impattato da una roccia. Per fare ciò hanno valutato l'esposizione del veicolo al rischio nei casi in cui il veicolo soste o meno nell'area stessa in termini di velocità di attraversamento, visibilità, tempo di sosta, lunghezza del tratto pericoloso.

Probabilità di impatto (Impact Probability, P_i): deriva dal prodotto della pericolosità (H) per l'esposizione degli elementi a rischio (E_s).

Nel caso particolare di una struttura statica, essendo il valore dell'esposizione $E_s = 1$, ne deriva l'uguaglianza tra P_i e H.

Valore degli elementi a rischio (Worth of Element at Risk, W): valore stabilito in termini monetari, di utilizzo o altro per ciascuno degli elementi a rischio.

Gli elementi a rischio sono rappresentati da beni e attività esistenti in un'area esposta ad un determinato pericolo e pertanto passibili di subire danni a seguito dell'accadimento dello stesso (esempio, persone, strutture e infrastrutture pubbliche e private, attività economiche e loro interruzione, beni ambientali, ecc.).

Il valore degli elementi a rischio può essere determinato valutando il valore del singolo elemento e moltiplicando quest'ultimo per il numero di elementi presenti.

La quantificazione degli elementi a rischio dipende dalla loro tipologia: ad esempio il n. di unità discrete (N) per edifici, attività commerciali, ecc.; l'unità di superficie (S, espressa in m², ha, ecc.) per terreni, lotti abitativi, ecc.

Per il calcolo del valore esistono diversi approcci: il calcolo di un valore discreto dei singoli elementi; l'utilizzo di funzioni di utilità; l'utilizzo di formule empiriche; la stima qualitativa del valore complessivo per una certa area.

Nel primo approccio, il valore degli elementi a rischio è espresso come sommatoria del valore discreto dei singoli elementi.

Il trattamento e il confronto di tipologie differenti di elemento è possibile qualora venga attribuito un valore di riferimento unico per tutti gli elementi (es.: valutazione di tipo assicurativo).

In alternativa è possibile trattare separatamente diverse tipologie di elemento, rendendo però impossibile la valutazione di un valore assoluto complessivo.

Quest'ultima modalità è stata scelta dal progetto PER (DRM, 1990), per il quale sono state definite due diverse scale di valori: per i danni alle persone si è scelta come unità di misura il valore della vita umana (tabella 1); per i danni alle cose si è scelto il valore economico. (Il progetto PER ha stimato dei costi assoluti in franchi francesi; per comodità sono riportati in tabella 2 i costi espressi in termini relativi rispetto al valore di un ettaro di terreno agricolo).

Il secondo approccio utilizza le funzioni di utilità per esprimere il valore dei singoli elementi.

Un esempio di tale approccio è riportato da Einstein (1988). In pratica, anziché attraverso un valore discreto, gli elementi a rischio sono caratterizzati da funzioni di utilità $u(x)$ in cui il costo sociale o individuale per la perdita di un certo elemento è espresso da una funzione e non dal singolo valore. Per ogni elemento dunque bisogna individuare un andamento dell'utilità sociale o individuale (valore) di ogni elemento (es: andamento lineare, logaritmico, inverso, esponenziale, a scalino, sigmoidale, ecc.).

Il valore finale sarà espresso come semplice sommatoria delle utilità dei singoli elementi:

$$U = \sum_i w_i u(x_i) \quad (6)$$

Tabella 1

Costo relativo degli elementi a rischio connessi con la vita umana in Francia (nota: i feriti hanno un valore attribuito maggiore delle stesse vite umane, a causa degli elevati costi sociali di cura e invalidità connessi)

| Elemento | Costo relativo |
|-------------|----------------|
| Morti | 1 |
| Feriti | 2-3 |
| Senza tetto | 0.2-1 |

Fonte: DRM (1990).

Tabella 2

Costo relativo per ettaro connesso all'uso del suolo in Francia.

| Uso del suolo | Beni | Attività |
|---|------|----------|
| Zona agricola | 1 | 0.5 |
| Abitazioni isolate | 6 | 2 |
| Gruppi di case | 10 | 1 |
| Grandi insediamenti | 23 | 8 |
| Zona artigianale, industriale o commerciale | 8 | 28 |
| Centri urbani | 16 | 30 |

Fonte: DRM (1990) modificato da Canuti e Casagli (1996).

dove w_i rappresenta il peso da attribuire al singolo elemento nell'utilità complessiva.

L'utilizzo delle funzioni di utilità comporta una migliore flessibilità ed adattamento alle complesse condizioni che determinano il costo complessivo delle perdite.

Il terzo approccio prevede l'utilizzo di funzioni empiriche per il calcolo di un valore quantitativo complessivo degli elementi a rischio.

Un primo metodo è espresso dalla formula di Del Prete et al (1992):

$$W = [R_m (M_m - E_m)] N_{ab} + N_{ed} C_{ed} + C_{str} + C_{morf} \quad (7)$$

dove:

R_m = reddito medio abitanti area;

M_m = età media di morte degli abitanti dell'area;

E_m = età media abitanti dell'area;

N_{ab} = n° abitanti nell'area;

N_{ed} = n° edifici presenti nell'area;

C_{ed} = costo medio degli edifici esistenti;

C_{str} = costo delle strutture e infrastrutture esistenti;

C_{morf} = costo delle modificazioni morfologiche.

Il quarto approccio consiste in una stima qualitativa complessiva del valore relativo degli elementi esposti al rischio. Questo approccio risulta talvolta utile per aree particolarmente ampie, nelle quali è complicato analizzare il valore dei singoli elementi.

La Regione Lombardia (1999) ha proposto una scala di valore basata sulle tavole di azionamento dei Piani Regolatori Generali dei Comuni. Le zone urbanistiche sono state accorpate in quattro classi, ad ognuna delle quali è stato assegnato un valore relativo (tabella 3).

Vulnerabilità (Vulnerability, V): grado di danneggiamento e/o perdita per un elemento o un insieme di elementi a rischio determinato dall'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso (Varnes et al., 1984).

Tale grandezza varia tra 0 (nessuna perdita) e 1 (distruzione completa).

Essendo in funzione delle caratteristiche degli elementi e dell'intensità dei fenomeni, la vulnerabilità dello stesso elemento per fenomeni pericolosi differenti deve essere valutata in modo differente.

La vulnerabilità dipende da molteplici fattori, oltreché dall'interazione degli stessi, ed è per tale ragione molto difficile da determinare. Per la sua valutazione esistono due approcci fondamentali: quello quantitativo e quello euristico.

Un *approccio quantitativo* è finalizzato al calcolo di un valore numerico della vulnerabilità compreso tra 0 ed 1 per ogni elementi a rischio. La vulnerabilità

Tabella 3
Scala di valutazione del valore degli elementi a rischio.

| Elementi a rischio | Zone urbanistiche |
|--------------------|---|
| E1 | zona boschiva zona agricola estensiva demanio pubblico |
| E2 | zona agricola speciale infrastrutture pubbliche (strade comunali o consortili non strategiche) zona di protezione ambientale verde pubblico attrezzato, parchi urbani |
| E3 | infrastrutture pubbliche (strade statali, provinciali e comunali strategiche, ferrovie, lifelines: oleodotto, elettrodotta, acquedotto) zone per impianti tecnologici e discariche RSU o inerti; zone di cava |
| E4 | centri urbani nucleo rurale minore di particolare pregio zone di completamento urbanistico zone di espansione urbanistico zona artigianale, industriale, commerciale servizi pubblici infrastrutture pubbliche principali e strategiche zona discarica speciali e tossico-nocivi zona alberghiera zona per campeggi e villaggi turistici |

Fonte: Piani Regolatori Generali dei Comuni.

complessiva sarà espressa da una funzione $f(V)$ di densità di distribuzione dei singoli valori con una media $E(V)$.

Il calcolo della vulnerabilità dei singoli elementi risulta assai complesso. Le variabili da tenere presenti sono infatti: l'intensità del fenomeno, la costituzione e struttura dell'elemento, la posizione dell'elemento rispetto al fenomeno, la presenza di eventuali protezioni.

L'intensità del fenomeno influenza la vulnerabilità in modo molto intuitivo: maggiore è l'intensità del fenomeno e maggiore sarà la vulnerabilità degli elementi a rischio. È importante sottolineare che una corretta valutazione della vulnerabilità richiederebbe la conoscenza dell'intensità in ogni punto dello spazio (o quantomeno in corrispondenza degli elementi esposti al rischio) e non l'intensità media dell'intero fenomeno.

L'aspetto costitutivo strutturale è legato ad alcune proprietà intrinseche degli elementi a rischio, quali i materiali di costruzione, la resistenza agli urti, l'elasticità, la flessibilità, la durezza. È evidente che a seconda del tipo di elemento che subirà l'impatto saranno diverse le caratteristiche costitutive da valutare.

La posizione dell'elemento rispetto al fenomeno influenza la modalità di impatto e perciò la vulnerabilità. Per posizione si intende l'orientazione dell'elemento rispetto al fenomeno, la parte dell'elemento che viene impattata dal fenomeno, la posizione che l'elemento assume durante l'impatto, la posizione rispetto ad altri elementi a rischio.

La presenza di eventuali protezioni influisce in modo del tutto comprensibile sulla vulnerabilità. È altresì evidente che la protezione offerta dipende dall'efficacia delle protezioni, e quindi dalla qualità costruttiva e progettuale, dalla manutenzione, dall'età, ecc. Nella vulnerabilità rientrano concettualmente solo le protezioni applicate direttamente agli elementi e che pertanto diventano attributi propri dell'elemento stesso.

Le reti di protezioni, i valli paramassi, gli argini e tutte le altre opere di mitigazione sul territorio influiscono sulla pericolosità (meglio, sull'evoluzione dei fenomeni) piuttosto che sulla vulnerabilità; inoltre tali opere di mitigazione vengono considerate per la valutazione del rischio residuo piuttosto che del rischio totale.

Il calcolo della vulnerabilità a partire da questi fattori potrebbe essere effettuato, in modo quantitativo, sulla base di modelli deterministici o statistici. Per i primi è necessario definire tutte le funzioni deterministiche che descrivono la vulnerabilità in funzione dei fattori di partenza; per i secondi è necessario avere un campione di dati abbastanza ampio da ottenere delle regressioni statisticamente significative.

Vista la complessità dei calcoli e della modellazione richiesta, questo tipo di valutazione viene utilizzata raramente e soltanto in ambiti territoriali molto ristretti a grande scala.

Una strategia che porta ad una stima quantitativa più semplice e più generalmente applicabile è la determinazione della vulnerabilità per aree omogenee di territorio.

Il metodo si basa sull'individuazione di relazioni funzionali tra vulnerabilità e fattori di controllo della stessa, utilizzando valori mediati in un intervallo territo-

riale di riferimento. Analogamente alla pericolosità è necessario definire a priori il tipo di unità territoriale da utilizzare nella valutazione: non necessariamente l'unità deve corrispondere a quella utilizzata per la pericolosità.

Le unità più comunemente utilizzate sono *pixels*, *unique-condition units*, unità territoriali amministrative (Comuni, Comunità Montane, Province, ecc.).

Sulle prime due abbiamo già accennato nel capitolo dedicato alla valutazione della pericolosità, al quale si rimanda. L'unica osservazione che vale la pena fare è che le unità *unique-conditions* saranno diverse da quelle della pericolosità perché basate sulla sovrapposizione di tematismi (condizioni) differenti.

Le unità amministrative vengono utilizzate perché molto comode per la gestione dei dati di tipo socio-economico e demografico che vengono utilizzati per il calcolo della vulnerabilità.

Inoltre, le unità amministrative sono spesso utilizzate per descrivere la distribuzione del valore degli elementi a rischio.

La valutazione della vulnerabilità si basa su funzioni, semplici o complesse, tra la vulnerabilità ed i fattori di controllo. Queste funzioni possono essere costruite in modo statistico (regressioni) o deterministico.

La forma più semplice di questi approcci è quella che mette in relazione la vulnerabilità con un solo parametro (es. densità di popolazione di una zona esposta a rischio, Fell, 1994). È evidente che questo metodo porta con sé una notevole approssimazione che si riflette necessariamente sulla qualità dei risultati. L'utilizzo di più parametri può consentire una riduzione di questa approssimazione. Un esempio è offerto da Mejía-Navarrez e Garcia (1996) all'interno di un software appositamente costruito per la valutazione del rischio (IPDSS, Integrated Planning Decision Support System) dove la vulnerabilità è definita, nella forma generale, come:

$$V = \frac{aD + bU + cL}{a + b + c} \quad (8)$$

dove:

D = densità di popolazione per unità territoriali;

U = vulnerabilità dell'uso del suolo;

L = presenza di vie di comunicazione;

a, b, c = pesi da assegnare alle tre variabili.

Per il calcolo di *U* sono assegnati valori di vulnerabilità diversa alle diverse tipologie di uso in funzione della vulnerabilità fisica e della modalità di fruizione delle infrastrutture. I diversi usi vengono catalogati per ogni unità territoriale e pesati in funzione dell'area occupata all'interno delle stesse.

Per il calcolo di *L* sono stati individuati dei *buffer* (aree di intorno) attorno alle vie di comunicazione di spessore variabile a seconda dell'importanza della via; la percentuale di area *bufferizzata* in ogni unità è stata quindi utilizzata per il calcolo finale.

I pesi vengono assegnati mediante scelte soggettive basate sulla conoscenza generale dell'area di studio e delle problematiche ad essa connesse. Nell'esempio

riportato dagli autori (un'area attorno a Glenwood Springs, Colorado, USA) la formula assume la forma:

$$V = \frac{10D + 7U + 2L}{19} \quad (9)$$

Un'attenta analisi della letteratura esistente in tema di vulnerabilità mostra la prevalenza di approcci di tipo euristico che portano ad una stima qualitativa o semi-quantitativa della vulnerabilità espressa generalmente in classi.

Questi metodi si basano su stime soggettive (Fell, 1994, tabella 4) o sull'utilizzo di apposite matrici.

Questi tipi di approccio inoltre tendono a tenere una distinzione tra la vulnerabilità per la vita umana e quella per i beni economici.

La vulnerabilità per l'incolumità umana viene espressa per esempio dalla probabilità che si possano avere morti, feriti o senzatetto nel caso di un determinato evento.

In alcuni casi questa probabilità viene espressa direttamente in funzione dell'intensità del fenomeno (Tabella 5).

La vulnerabilità di beni economici esprime la percentuale del valore economico che può essere pregiudicato dal verificarsi del fenomeno franoso.

Concettualmente il danno economico è legato ai danni a beni materiali (abitazioni, edifici commerciali, colture, infrastrutture, ecc.), nonché danni alle attività (interruzione viabilità, interruzione alle comunicazioni, ecc.).

Tabella 4
Scala di vulnerabilità (V) di beni e attività.

| Vulnerabilità di beni e attività | V |
|----------------------------------|------------|
| Estremamente elevata | ≥ 0.9 |
| Elevata | 0.5-0.9 |
| Media | 0.1-0.5 |
| Bassa | 0.05-0.1 |
| Molto Bassa | < 0.05 |

Fonte: Fell, 1994.

Tabella 5
Probabilità di conseguenze sul piano umano per i diversi livelli di intensità (H, intensità riferita al rischio per le persone).

| Elemento | H ₀ | H ₁ | H ₂ | H ₃ |
|------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Morti | 0 | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻³ | 10 ⁻² |
| Feriti | 0 | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻² | 10 ⁻¹ |
| Senzatetto | 0 | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻¹ | 10 ⁻¹ |

Fonte: Fell, 1994.

Per quanto riguarda i beni materiali è possibile stimare, in funzione del dettaglio, la vulnerabilità dei singoli edifici (fondazioni, ecc.) o di aree particolari e omogenee (utile per problemi di pianificazione territoriale e urbanistica).

Nel caso di un singolo immobile, i danni che possono verificarsi sono di tipo estetico, funzionale, strutturale e chiaramente, a seconda del tipo, i danni sono più o meno gravi.

L'approccio più completo per la vulnerabilità dei beni immobili è quello proposto dal DRM (1990), che schematizza il tipo di danno (tabella 6) e successivamente lo associa alle diverse tipologie di beni immobili, catalogati secondo il seguente sistema.

A = vecchie costruzioni di qualità mediocre, prive di fondazioni e elementi strutturali di raccordo, costruite senza rispetto di norme specifiche. Vi ricadono anche le costruzioni di classe B se con degrado degli elementi strutturali;

B = edifici tradizionali in muratura o prefabbricati leggeri senza struttura in cemento armato (villette, piccoli condomini, ecc.);

C = edifici di buona qualità realizzati in calcestruzzo o con elementi prefabbricati provvisti di armatura; 2 sottoclassi:

C1 = edificio singolo di modeste dimensioni;

C2 = condominio di almeno 3 piani.

A scala relativamente piccola è possibile associare percentuali di danno ad aree omogenee invece che ai singoli elementi a rischio, in funzione dell'uso del suolo.

Sulla base di questi elementi viene associata l'intensità di fenomeni al tipo di movimento ed ai relativi danni ai beni immobili (tabella 7).

Vista la complessità del problema e l'esigenza di utilizzare parametri di diversa natura, la stima della vulnerabilità costituisce uno degli aspetti più critici di tutta la procedura di valutazione del rischio.

Per questo motivo prevalgono in letteratura gli approcci euristici e soggettivi di cui abbiamo detto sopra. I vantaggi di tali approcci sono legati essenzialmente

Tabella 6
Scala convenzionale della severità dei danni.

| Grado di danno | % del valore della costruzione | Tipo di danno |
|----------------|--------------------------------|--|
| 1 | Qualche % | Danni leggeri non strutturali. Stabilità non pregiudicata |
| 2 | 10-30 | Fessurazione dei muri |
| 3 | 50-60 | Deformazioni importanti. Fessure aperte e conseguente evacuazione necessaria |
| 4 | 70-90 | Cedimento parziale dei pavimenti, brecciate nei muri, disarticolazione delle pareti. Evacuazione immediata |
| 5 | 100 | Distruzione totale e recupero impossibile |

Fonte: DRM, 1990.

Tabella 7

Valutazione relativa del grado di danno medio (vedi tabella precedente) generato da frane di diverso tipo e intensità (E, intensità riferita al rischio per beni, in funzione delle caratteristiche delle costruzioni esposte.

| Intensità | Tipo di movimento | A | B | C ₁ | C ₂ |
|-----------|-------------------|-----|-----|----------------|----------------|
| E1 | Scivolamento | 5 | 3-4 | 2 | 1-2 |
| | Colamento | 2-5 | 1-3 | 1-2 | 1 |
| | Crollo | 4-5 | 3-5 | 3-5 | 2-3 |
| E2 | Scivolamento | 5 | 5 | 3-5 | 3-5 |
| | Colamento | 3-5 | 1-4 | 1-3 | 1 |
| | Crollo | 5 | 5 | 5 | 4-5 |
| E3 | Scivolamento | 5 | 5 | 4-5 | 4-5 |
| | Colamento | 5 | 3-5 | 1-5 | 1-5 |
| | Crollo | 5 | 5 | 5 | 5 |
| E4 | Scivolamento | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Colamento | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | Crollo | 5 | 5 | 5 | 5 |

Fonte: DRM, 1990.

alla facilità di valutazione e di applicazione. Gli svantaggi riguardano la mancanza di una valutazione quantitativa della vulnerabilità, ragion per cui non sono adatti ad una valutazione quantitativa del rischio totale, l'elevato grado di soggettività nelle stime e quindi l'elevato margine di incertezza con l'impossibilità di quantificare quest'incertezza e di valutare la propagazione degli errori;

Al contrario un approccio rigorosamente quantitativo si trova di fronte alla difficoltà di integrare e gestire grandezze diverse e di difficile determinazione (caratteristiche costruttive, posizione dell'elemento, efficacia delle protezioni).

Valore potenziale delle perdite (Worth of Potential Loss, W_1): corrisponde al costo totale dei danneggiamenti e/o perdite subite a seguito dell'occorrenza di un fenomeno potenzialmente pericoloso: $W_1 = V * W$.

Il valore potenziale è definito come il prodotto della vulnerabilità per il valore degli elementi a rischio:

$$W_L = V * W \quad (10)$$

ed esprime il costo totale dovuto ad un certo fenomeno pericoloso.

Per definizione il valore delle perdite dipende dalle caratteristiche dell'elemento a rischio (valore e vulnerabilità) e dall'intensità dei fenomeni (attraverso la vulnerabilità). La curva che esprime la dipendenza dall'intensità ha ovviamente lo stesso andamento di quella della vulnerabilità.

Rischio specifico (Specific Risk, R_s): grado atteso di danneggiamento e/o di perdite. Deriva dal prodotto della pericolosità per l'esposizione e la vulnerabilità: $R_s = H * E_s * V$.

Il rischio specifico viene comunemente espresso come:

$$R_s = H * E_s * V = P_i * V \quad (11)$$

dove:

H = pericolosità;

V = vulnerabilità;

Es = esposizione;

Pi = probabilità di impatto = H*Es.

Il rischio specifico esprime il grado di danno atteso per un impatto avente una determinata probabilità ed una determinata intensità. Sia la probabilità di impatto sia la vulnerabilità sono dipendenti dall'intensità, per cui anche il rischio specifico è funzione dell'intensità del fenomeno.

Risulta pertanto significativo rappresentare il rischio specifico come funzione dell'intensità. Bisogna considerare innanzitutto che l'andamento di questa funzione non è affatto banale.

La probabilità di impatto dipende a sua volta dalla pericolosità e dall'esposizione, che hanno generalmente andamento opposto al variare dell'intensità. La pericolosità infatti tende spesso ad avere un andamento decrescente con l'intensità (sismi, alluvioni, ecc.). Questo andamento è regolato da complesse leggi fisiche che difficilmente sono stimabili in modo deterministico (es: accumulo di energia nei terremoti), ma che si basano in generale sul principio che un evento di grande intensità è più raro di uno a minore intensità. L'esposizione invece avrà un andamento crescente con l'intensità, dal momento che un fenomeno più intenso occuperà un'area maggiore e darà inoltre minori possibilità di fuga all'elemento a rischio (un crollo di 100 m³ sarà più difficile da evitare di un crollo di 1 m³).

Rischio totale (Total Risk, Rt): grado di danneggiamento e/o di perdite totale atteso subito dagli elementi a rischio. Deriva dal prodotto del rischio specifico con il valore degli elementi a rischio: $R_t = R_s * W$.

Il rischio totale è definito invece come:

$$R_t = R_s * W \quad (12)$$

ed esprime i danni totali attesi per un rischio specifico di una certa intensità.

La dipendenza del Rt dall'intensità non è modificata dal valore degli elementi a rischio, ed avrà pertanto un andamento del tutto analogo a quello descritto per il rischio specifico.

Diversamente il rischio totale può essere espresso anche come:

$$R_t = P_i * W_L \quad (13)$$

4. Considerazioni

La disamina del percorso generale che l'economia può adottare con riferimento ai rischi ambientali e di quello preso in considerazione nell'ambito geomorfologico e delle scienze della terra rendono evidenti alcuni aspetti, sui quali può essere opportuno sviluppare alcune riflessioni.

La valutazione del rischio nell'ambito tecnico sembra fortemente condizionata da altri approcci, nei quali la determinazione delle diverse grandezze considerate (pericolosità, vulnerabilità, rischio, valore delle perdite) è legata a fenomeni per i quali esistono dati storici che consentono di stimare i tempi di ritorno, gli effetti. Alluvioni, terremoti, eruzioni vulcaniche su un determinato territorio sono stati osservati, ne sono stati constatati gli effetti, sono state associati fattori causali agli stessi.

Queste considerazioni non sono immediatamente applicabili al caso delle frane, in quanto non sono presenti conoscenze circa il ripetersi degli eventi stessi; per questa ragione grande sviluppo hanno le informazioni descrittive il territorio, al fine di stimarne la pericolosità.

Successivamente sembra opportuno osservare, sempre dal punto di vista generale, come l'analisi geomorfologica sia molto analitica, sino al punto di considerare una serie estremamente approfondita di particolari (quali l'esposizione al rischio e la probabilità d'impatto) che, nel contesto di fenomeni di dimensione elevata appaiono trascurabili, mentre assumono rilievo con riferimento a fenomeni di limitatissime dimensioni e, pertanto, di minore importanza dal punto di vista economico.

Lo sforzo effettuato per introdurre variabili economiche negli schemi d'analisi, ancora una volta, sembra concentrarsi sull'analisi dei particolari, trascurando il quadro d'insieme del territorio nel quale avviene il fenomeno franoso, dal punto di vista delle dinamiche economiche e sociali.

L'attenzione viene infatti focalizzata sui singoli elementi a rischio (oggetti statici presenti sul territorio: beni immobili, reti, infrastrutture; persone residenti o presenti negli oggetti), assegnando un valore a ciascuno degli elementi. Risulta evidente, in tale ambito, la necessità di precisare quale tipo di valore venga considerato, poiché è nota la grande differenza che può essere osservata stimando tipi di valore differenti per lo stesso bene.

Una ulteriore considerazione può essere sviluppata in relazione alla valutazione: le dinamiche economiche presenti un'area possono essere, qualora vengano danneggiati dei beni strumentali nello svolgimento delle attività tipiche (ad esempio vie di comunicazione, reti energetiche in un'area con attività turistiche, artigianali, industriali) compromesse per tutto il periodo nel quale le stesse vie o reti non vengono ripristinate. In linea di principio si può anche ipotizzare razionalmente che gli effetti negativi possano proseguire oltre il momento di ripristino (ad esempio in un'area turistica) a causa di fattori psicologici. Infine, sempre in questo ambito, non vanno trascurati, almeno in termini potenziali (UNDP, 1994), i danni intangibili che possono gravare sulle comunità locali a seguito del fenomeno franoso.

Bibliografia

Breyers, S., (1993). *Breaking the Vicious Circle: Toward Effective Risk Regulation*. Cambridge, MA. Harvard University Press.

- Bunce, C.M., Cruden, D.M. e Morgenstern, N.R., (1997). *Assessment of the hazard from rock fall on a highway*. Canadian Geotechnical Journal. 34. pp. 344-356.
- Canuti, P. e Casagli, N., (1996). *Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana*. Atti del Convegno "Fenomeni Franosi e Centri Abitati", Bologna, 27 maggio 1994. CNR-GNDC. Regione Emilia Romagna: 29-130 (CNR-GNDCI pubbl. n. 846).
- Chapman, K e Hariharan, G., (1996). Do poor people have a stronger relationship between income and mortality than the rich ? Implications of panel data for health-wealth analysis. *Journal of Risk and Uncertainty*. 12. pp. 54-64.
- Crocker, T. D. e Shogren, J. F. (1999). "Endogenous environmental risk". In: Van den Bergh, J. H. *Environmental and Resource Economics*. E. Elgar. Cheltenham. pp. 215-222.
- Crosta, G. e Locatelli, C., (1999). *Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo*. In: Orombelli (editor): Studi in onore di Severino Belloni. Glauco Brigati, Genova.
- Crosta, G., Frattini P. e Sterlacchini, S., (2001). Valutazione e Gestione del Rischio da Frana. Principi e Metodi. 1. In: "Valutazione della Pericolosità e del Rischio da Frana in Lombardia", 26-27 Settembre 2001, Milano.
- Del Prete, M., Giaccari, E. e Trisorio-Liuzzi, G., (1992). *Rischio da frane intermittenti a cinematica lenta nelle aree montuose e collinari urbanizzate della Basilicata*. Pubbl. n. 841 - GNDCI.
- Di Cocco, E., (1960). *La valutazione dei beni economici*. Bologna. Calderini.
- DRM, Délégation aux Risques Majeurs, (1988). *Evaluation de la vulnérabilité*. Plan d'Exposition aux Risques. Ministère de l'Environnement. Direction de l'Eau et de la Prévention des Pollutions et des Risques. La Documentation Française, pp. 112.
- DRM. Délégation aux Risques Majeurs, (1990). *Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs*. Secrétariat d'État auprès du premier Ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs. La Documentation Française. pp. 143.
- Einstein, H.H., (1988). *Special Lecture: Landslide risk assessment procedure*. Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, July 1988, Lausanne. In: C. Bonnard (editor). "Landslide". 2. pp. 1075-1090.
- Fell, R., (1994). Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*. 31. pp. 261-272.
- Finlay, P.J. e Fell, R., (1997). Landslides: risk perception and acceptance. *Canadian Geotechnical Journal*. 34. pp. 169-188.
- Guatri, L., (1998). *Trattato sulla valutazione delle aziende*. EGEA, Giuffrè. Milano.
- Laffont, J., (1995). Regulation, moral hazard and insurance of environmental risks. *Journal of Public Econom.* 80. pp. 623-648.
- Loomes, G. e Sudgen, R., (1987). Some implications of a more general form of regret theory. *Journal of Economic Theory*. 41. pp. 270-287.
- Machina, M., (1982). Expected utility theory without the independence axiom. *Econometrica*. 50. pp. 277-323.
- Marshall, J., (1976). Moral hazard. *Amer. Economic Rev.* 66. pp. 880-890.
- Mejía-Navarro, M. e García, L.A., (1996). *Natural Hazard and Risk Assessment using decision support systems, application: Glenwood Springs, Colorado*. Environmental and Engineering Geoscience. 2/3. pp. 299-324.
- National Academy of Sciences, (1983). *Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process*. Washington, DC. Nat..Academy Press.
- Norton, G., (1984). *Resource Economics*. London. E. Arnold.
- O'Riordan, T. e Cameron, J., (1994). *Interpreting the Precautionary Principle*. London. Cameron & May.
- Pearce, D., (1998). "Valuing Risks". In: P.Calow (editor). *Handbook of Environmental Risk Assessment and Management*. pp. 345-364. Oxford. Blackwell Science.
- Polelli, M., (2000). *Trattato di Estimo*. Rimini. Maggioli.
- Pierson, L. A., (1991). *The Rockfall Hazard Rating System*. Proc. National Symp. on Highway and Railroad Slope Maintenance. Association of Engineering Geologists. Chicago. pp. 1-22.

- Starmer, C.V., (1998). "The Economics of Risk". In: Calow, P. (editor). *Handbook of Environmental Risk Assessment and Management*. Oxford. Balckwell Science. pp. 319-344.
- Starr, C., (1969). Social Benefit versus technological risk. *Science*. 165. 1232-1238.
- Stewart, B.G., (1991). *The Quest for Value*. New York. HarperCollins.
- Torrance, G.W., (1986). Measurement of health state utilities for economic appraisal. *J. of Health Economics*. 5. pp. 1-30.
- UNDP, (1994). *Disaster Economics*. New York. DHA.
- USEPA, (2000). *Economic Background Document*. RCRA K174/175 Listing Final Rule. Washington DC. USEPA. OSW.
- Varian, H.R., (1993). *Intermediate Microeconomics. A Modern Approach*. pp. 202-230. New York. W.W.Norton.
- Varnes, D. J. e Commission on Landslides and Other Mass Movements, IAEG (1984). *The principles and practise of landslide hazard zonation*. The UNESCO Press, Paris.
- Viscusi, W. K., (1992). *Fatal tradeoffs*. Oxford University Press.