

## Analisi della suscettibilità da frana a scala di bacino (Bacino del Fiume Arno, Toscana-Umbria, Italia)

Anna Bartolomei<sup>1</sup>, Marcello Brugioni<sup>3</sup>, Paolo Canuti<sup>1</sup>, Nicola Casagli<sup>1</sup>, Filippo Catani<sup>1</sup>,  
Leonardo Ermini<sup>2</sup>, Minja Kukavacic<sup>1</sup>, Giovanni Menduni<sup>3</sup>, Veronica Tofani<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, Italia, anna.bartolomei@unifi.it  
paolo.canuti@unifi.it, nicola.casagli@unifi.it, filippo.catani@unifi.it, minja.kukavacic@unifi.it, veronica.tofani@unifi.it

<sup>2</sup>Provincia di Firenze, Firenze, Italia, l.ermi@provincia.fi.it

<sup>3</sup>Autorità di Bacino del Fiume Arno, Firenze, Italia, m.brugioni@arno.autoritadibacino.it, g.menduni@arno.autoritadibacino.it

*Landslide susceptibility analysis at catchment scale (Arno River Basin, Tuscany-Umbria, Italy)*

**ABSTRACT:** This paper presents the methodology adopted and the outcomes obtained in a recent analysis of landslide hazard in the Basin of Arno River (Central Italy), about 9100 km<sup>2</sup>, as part of a project sponsored by the Basin Authority of the Arno River started in the year 2002 and completed in the year 2005. All the required data were recorded in a GIS-database and synthesized in several thematic maps and in a landslide inventory. According to the landslide types prevailing in the study area and the results of statistical analysis, five preparatory factors were selected: slope, lithology, land cover, profile curvature and upslope contributing area, which after GIS-overlay operations generated the basic units for the statistical treatment (Unique Conditions Units). The hazard assessment was extended to landslide-free areas by the application of multivariate statistical methods, implemented in ANN (Artificial Neural Networks). The neural predictors were trained using a selected training set. The neural networks affected by acceptable errors and having a high generalization potential were applied to the total data set, in order to generate prediction values for the susceptibility index for each UCU. Finally, the output values were reclassified in different hazard levels on the basis of threshold criteria and validated by comparison with the inventory map. In average, 81% to 96% of the area affected by instability was correctly classified by the prediction. Moreover, the model shows the occurrence of highly hazardous areas in zones with no mapped landslides, that can indicate possible problems of incompleteness or undersampling of the inventory itself.

*Key terms:* landslide, hazard, artificial neural networks

*Termini chiave:* frane, pericolosità, reti neurali artificiali

### Riassunto

In questa nota vengono presentati i metodi applicati e i risultati ottenuti in una recente analisi della pericolosità da frana, condotta sul territorio del Bacino del Fiume Arno nell'ambito di una convenzione tra l'Autorità di Bacino e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze (2002-2005).

Tutti i dati acquisiti, confluiti in una banca dati GIS, sono stati sintetizzati in carte tematiche e in una carta inventario delle frane. La sovrapposizione dei fattori predisponenti selezionati (pendenza, litologia, uso del suolo, curvatura di profilo e area drenata) ha permesso di definire le unità elementari per il trattamento statistico (Unità Territoriali Omogenee: UTO). La valutazione della pericolosità è stata estesa alle aree prive di movimenti franosi utilizzando metodi statistici multivariati implementati in Reti Neurali Artificiali. L'area di studio è stata suddivisa in cinque Macroaree morfologicamente e geologicamente omogenee: per ogni Macroarea, i predittori

neurali sono stati addestrati su un opportuno sottoinsieme di dati, applicando poi i migliori all'intero *data-set* al fine di generare valori previsti dell'indice di suscettibilità per ogni UTO. Infine, i valori di uscita sono stati riclassificati in differenti livelli di pericolosità in base a criteri di soglia e validati per confronto con l'inventario.

Una percentuale di area in frana compresa tra l'81 e il 96% risulta correttamente classificata dalla previsione nelle varie Macroaree.

### 1. Introduzione

Come segnalato dal rapporto pubblicato molto recentemente dalla International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC, 2005), le vittime a scala mondiale causate dalle catastrofi naturali hanno raggiunto nel 2004 le 250.000 unità; in Italia, al primo posto in Europa e al quarto nel mondo per occorrenza di dissesti idrogeologici, si sono verificate negli ultimi cento anni decine di migliaia di fenomeni franosi (AA.VV., 2005), che hanno causato

numerose vittime e indotto più o meno gravi effetti diretti e indiretti sull'economia e sul tessuto sociale locali (Bianco & Maggi, 2000).

In seguito al riconoscimento della natura socio-economica dei fenomeni franosi, sono state svolte e vengono tuttora condotte numerose ricerche, a livello sia nazionale che internazionale, volte alla caratterizzazione, previsione e prevenzione dei fenomeni franosi nonché alla valutazione e gestione delle loro conseguenze, sulla base della considerazione che gli eventi franosi possono essere previsti con rigore scientifico e, in genere, con sufficiente preavviso, previa acquisizione di un'adeguata conoscenza delle condizioni del territorio. In tale contesto si inquadra il programma di studi comune tra l'Autorità di Bacino del Fiume Arno e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, per l'aggiornamento e l'integrazione della cartografia di pericolosità e di rischio da frana relativa al territorio del Bacino dell'Arno (9100 km<sup>2</sup>) nell'ambito del Piano di Assetto Idrogeologico (PAI).

Soeters & Van Westen (1996), Van Westen *et al.* (1997) e Aleotti & Chowdhury (1999) hanno proposto di suddividere le procedure di valutazione della pericolosità esistenti in quattro metodologie principali: inventari di fenomeni franosi; metodi euristici; metodi deterministici; analisi statistiche, bivariate o multivariate.

Queste ultime garantiscono un minor grado di soggettività rispetto ai metodi euristici e, a differenza dei metodi deterministici, che richiedono l'acquisizione di informazioni dettagliate sui parametri che influenzano la stabilità dei versanti e sulle geometrie di rottura, risultano idonee ad analisi di pericolosità su vasta area, come nel caso in questione, in cui l'area di studio corrisponde ad un intero bacino idrografico; inoltre, permettono di identificare e di descrivere con maggiore precisione le relazioni esistenti tra fenomeni franosi e fattori predisponenti, soprattutto nella modellazione di frane di riattivazione, prevalenti nel Bacino dell'Arno.

## 2. Inquadramento geologico dell'area di studio

Il Bacino del fiume Arno ricade nel territorio della Regione Toscana per il 98% circa e della Regione Umbria per il 2% circa, comprendendo le province di Arezzo, Firenze, Pistoia, Pisa e, parzialmente, quelle di Siena, Lucca, Livorno e Perugia.

Esso è ubicato in corrispondenza del settore settentrionale della catena a falde appenninica, derivata dalla deformazione terziaria di un settore del paleomargine continentale della Microplacca Adriatica prospiciente al Dominio Oceanico Ligure (Boccaletti *et al.*, 1971; Alvarez *et al.*, 1974; Kligfield, 1979) e costituita dall'impilamento di unità tettoniche appartenenti a domini paleogeografici differenti (Ligure, Sub-Ligure, Toscano e Umbro-Marchigiano). Le strutture compressive sono state successivamente interessate da un'importante tettonica distensiva: in Toscana meridionale, la principale fase

distensiva è di età pre-tortoniana ed è stata caratterizzata da faglie normali di basso angolo che hanno determinato la sovrapposizione delle unità superiori (Liguridi) della struttura accrezionaria al margine continentale dell'Adria, costituito dal Complesso Metamorfico (AA.VV., 2001). La struttura ad *horst-graben* con allineamento NW-SE, sviluppata durante il tardo Miocene-Pleistocene e associata ad eventi vulcanici, ha tagliato le già esistenti strutture compressive ed estensionali; le depressioni tipo *graben* così generate sono state colmate da sedimenti continentali, lacustri e marini, depositatisi dal tardo Tortoniano fino al Quaternario.

Il territorio del Bacino dell'Arno può essere classificato come prevalentemente collinare: esso alterna zone di pianura, in cui affiorano depositi fluvio-lacustri pliocenico-quaternari di tipo granulare e coesivo, a quattro dorsali principali: Monti Pisani-Montagnola Senese, costituita da rocce clastiche e carbonatiche del Paleozoico e del Mesozoico; Monte Albano-Chianti, composta prevalentemente da unità flyschoidi di età mesozoica e terziaria; Calvana-Monte Morello-Pratomagno, in cui affiorano formazioni flyschoidi calcaree e arenacee appartenenti rispettivamente alle Liguridi e alla Serie Toscana; Monte Falterona-Mandrioli-Alpe di Catenaia, costituita da formazioni flyschoidi arenacee e marnose riferibili alle Liguridi.

Sulla base delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche, l'area di studio è stata suddivisa in cinque macroaree sostanzialmente omogenee (Fig. 1):

- 1: Valdarno medio – Montagne pistoiesi e pratesi
- 2: Valdarno superiore – Valdichiana
- 3: Valdarno inferiore
- 4: Mugello – Casentino
- 5: Val d'Era e Val d'Elsa superiori.

## 3. Scelta dei fattori predisponenti e costruzione delle unità territoriali omogenee

Per la realizzazione della Carta di Pericolosità da frana del Bacino del Fiume Arno è stato adottato un modello misto, basato sull'applicazione di metodologie statistiche, implementate in sistemi computazionali di tipo neurale, per la valutazione della suscettibilità (previsione spaziale) e sull'utilizzazione dei dati della carta inventario dei fenomeni franosi per la stima della frequenza di occorrenza (previsione temporale). La carta inventario, che è stata realizzata nell'ambito del presente progetto e successivamente aggiornata con le risultanze del progetto ESA-SLAM (European Space Agency - Service for Landslide Monitoring), abbina infatti alla perimetrazione geometrica e alla classificazione tipologica dei dissesti informazioni di ottima qualità inerenti al loro stato di attività, ottenute tramite l'applicazione estensiva di tecniche fotointerpretative di alta precisione e l'uso di dati satellitari processati con la tecnica dei *Permanent Scatterers* (Ferretti *et al.*, 2001).

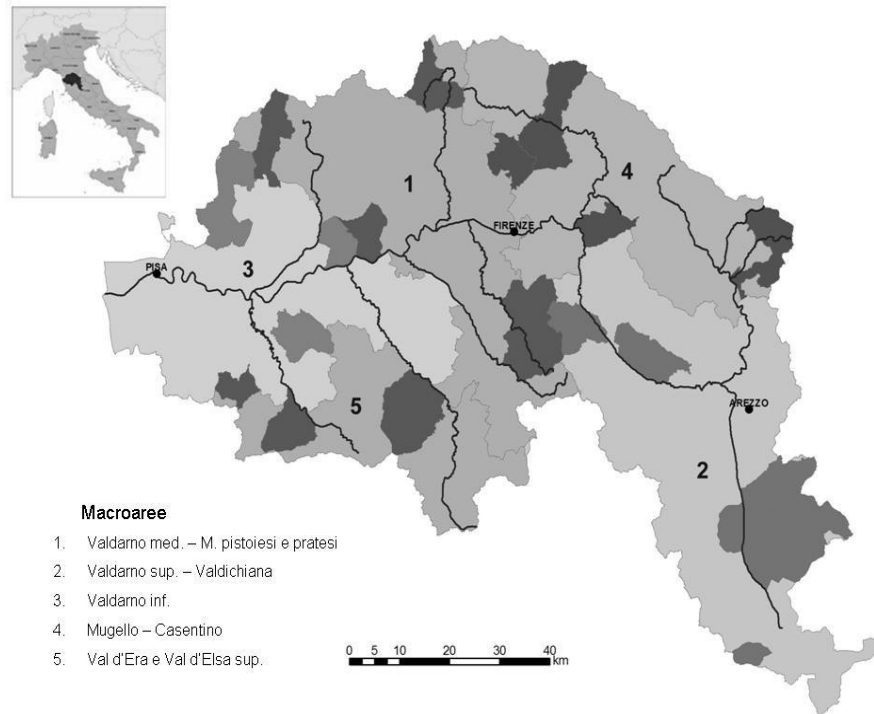


Fig. 1. Le cinque Macroaree in cui è stato suddiviso il Bacino dell'Arno. In tono più scuro, per ogni Macroarea, sono evidenziate le zone in cui l'inventario delle frane è caratterizzato dalle maggiori precisione e completezza, utilizzate per l'addestramento delle reti neurali  
*The subdivision of Arno River Basin in five Macroarees. Zones which landslide inventory is most accurate and complete are shown in darker tones for each Macroarea. Such areas have been employed as training sets*

Su un totale di 27500 fenomeni franosi rilevati nel Bacino dell'Arno, il 75 % è da attribuire a scivolamenti lenti; il 4,5% si riferisce a colamenti; l'1.2% è rappresentato da crolli; la percentuale restante comprende fenomeni di soliflusso e di franosità diffusa, mentre frazioni percentuali minime riguardano i movimenti rapidi, quasi certamente sottostimati per via della loro ridotta estensione areale (area media inferiore all'ettaro, rientrando nella zona di *roll-over* del grafico area-frequenza elaborato per il Bacino dell'Arno: Catani *et al.*, 2005) e della natura stessa dei fenomeni di questo tipo, le cui evidenze di movimento vengono facilmente e rapidamente obliterate dalla dinamica superficiale del versante e dai cambiamenti, anche stagionali, nella copertura del suolo.

Fenomeni franosi appartenenti a tipologie diverse non hanno la stessa intensità né sono ugualmente condizionati dai fattori predisponenti generalmente presi in esame (Zezeze, 2002). Pertanto, alcune analisi di statistica descrittiva sono state svolte preliminarmente alla fase di valutazione della pericolosità, incrociando i parametri di franosità tra loro e con le frane dell'inventario, allo scopo di individuare le caratteristiche salienti dei parametri stessi e gli intervalli di valori significativi per la loro classificazione, con particolare riferimento alle frane a cinematica lenta (Catani *et al.*, 2005).

Considerando le caratteristiche fisiche e di franosità del

territorio indagato, in cui più del 90% dei fenomeni riconosciuti è a cinematica lenta; le correlazioni tra variabili e i risultati dell'analisi statistica monovariata condotta per le singole variabili all'interno dei fenomeni franosi individuati; le limitazioni connesse alla difficoltà di acquisire, a scala di bacino, i dati necessari relativi a tutti i parametri utilizzati; tenuti presenti inoltre i principali lavori a livello internazionale (Aleotti & Chowdhury, 1999; Zezeze, 2002; Suzen *et al.*, 2004; Ermini *et al.*, 2005), sono stati selezionati i seguenti fattori predisponenti:

1. pendenza
2. curvatura di profilo
3. area drenata
4. litologia
5. copertura del territorio

I primi tre parametri, di tipo morfometrico, sono stati derivati a partire dal DTM del Bacino dell'Arno (Regione Toscana, 2002), caratterizzato da una struttura a celle quadrate con lato di 10 m.

### 3.1 Pendenza

La pendenza è stata calcolata secondo il metodo alle differenze finite lungo la direzione di massima pendenza (Wilson & Gallant, 2000) e suddivisa in cinque classi in funzione dei risultati della statistica descrittiva e degli angoli di resistenza al taglio residui e di picco relativi a movimenti franosi verificatisi in Appennino settentrionale

(Pellegrini *et al.*, 2001; Dapporto *et al.*, 2003).

### 3.2 Curvatura

La curvatura di profilo e la curvatura planare consentono rispettivamente di analizzare la presenza di eventuali contropendenze e di caratterizzare zone con flusso divergente o convergente: nella presente applicazione è stata utilizzata soltanto la curvatura di profilo, in quanto l'informazione fornita dalla curvatura planare è molto simile a quella fornita dall'area drenata. La curvatura di profilo, derivata seconda della superficie polinomiale di quarto ordine calcolata su una finestra 3x3, è stata suddivisa in tre classi: concava (valori negativi), convessa (valori positivi) e nulla, sulla base della metà della deviazione standard.

### 3.3 Area drenata

L'area drenata, o accumulazione di flusso, rappresenta l'estensione del sottobacino drenato dal pixel considerato. Il calcolo di questo parametro è stato effettuato come proposto da Tarboton (1997); quindi, si è proceduto alla suddivisione in tre classi, sulla base dei risultati ottenuti dalla statistica descrittiva.

### 3.4 Litologia

La litologia del Bacino dell'Arno è stata ricavata dalla "Carta litotecnica del Bacino dell'Arno" in scala 1:100.000, redatta dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze per l'Autorità di Bacino nel 1999. Nel presente lavoro, le originarie 32 classi sono state soggette a raggruppamenti in funzione del comportamento meccanico e ridotte alle seguenti 8 classi litotecniche:

1. Terreni coesivi
2. Terreni granulari
3. Rocce lapidee
4. Conglomerati e rocce carbonatiche poco cementate
5. Rocce deboli
6. Marne e argille compatte
7. Rocce lapidee con intercalazioni pelitiche, in cui sono state incluse le formazioni flyschoidi, estesamente affioranti in tutto il Bacino
8. Rocce pelitiche con intercalazioni lapidee.

### 3.5 Copertura del territorio

La carta di copertura del territorio utilizzata è stata prodotta nell'ambito del presente progetto come aggiornamento (2002) di quella realizzata nell'ambito del progetto CORINE Land Cover (Cumer, 1994; Heyman *et al.*, 1994): essa possiede un dettaglio di scala da 1:25.000 a 1:50.000 ed ha utilizzato informazioni derivanti dall'interpretazione di immagini telerilevate sia da satellite che da aereo. Nella nostra applicazione le classi originarie sono state ridotte a nove, facendo riferimento al primo e al secondo livello della legenda CORINE e legando le classi medesime all'influenza che ad esse viene tradizionalmente riconosciuta nella suscettibilità da frana.

L'intera area di studio è stata poi suddivisa, tramite sovrapposizione in ambiente GIS delle carte tematiche

relative ai vari fattori predisponenti (*overlay*), in Unità Territoriali Omogenee UTO (*Unique Condition Units*): queste rappresentano le più piccole unità spaziali significative nell'ambito dell'analisi e quindi le unità di base per il trattamento statistico, a cui assegnare un unico valore di suscettibilità. Il *grid* derivante dalla somma algebrica dei cinque strati informativi, contenente uno specifico codice per ogni UTO, è stato sottoposto ad un filtro allo scopo di ridurre il numero di poligoni risultanti, in molti casi privi di significato; successivamente esso è stato convertito in poligoni, per ognuno dei quali è stato possibile calcolare, tramite il comando *ArcGIS Zonal Statistics*, un indice di franosità (area in frana/area totale) da utilizzare come dato di taratura statistica. L'analisi svolta sui poligoni ha consentito di tenere in conto l'influenza, sull'indice di franosità, delle dimensioni e della posizione spaziale delle diverse porzioni costituenti una stessa UTO. L'area del poligono più piccolo è stata assunta come modulo del vettore-base, "pesando" le aree di tutte le altre UTO in funzione di essa.

## 4. Applicazione del metodo

Una zonazione della pericolosità da frana a scala di bacino deve necessariamente distinguere le aree in cui sono stati identificati fenomeni franosi da quelle apparentemente prive di dissesti. Nel caso di frane già individuate, rimane da definire il probabile tempo di ritorno delle riattivazioni del fenomeno; nel caso di porzioni di versante non comprese nelle aree in dissesto, ammesso che il versante non sia interessato da una frana non riconosciuta dall'operatore o obliterata dalle attività antropiche, occorre definire il grado di suscettibilità del versante in riferimento a possibili frane di neoformazione.

L'applicazione di metodi statistici multivariati appare estremamente indicata per questo tipo di indagine, in considerazione del fatto che le variabili ambientali sono contraddistinte da correlazioni reciproche più o meno significative di natura essenzialmente non lineare. La principale motivazione per cui si è stabilito di ricorrere specificamente alle ANN (*Artificial Neural Networks*) è che una rete neurale artificiale è il primo sistema, tra quelli statistici, che consenta una visione completa e complessa dei problemi di classificazione e regressione, nella quale sia possibile considerare aspetti difficilmente utilizzabili nell'ambito della statistica classica (gestione di variabili miste, dati affetti da rumore, impossibilità di formalizzare il problema con esattezza, ecc.) senza la necessità di formulare ipotesi preliminari sui dati ovvero partendo da ipotesi assai meno restrittive rispetto a quanto necessario nella statistica parametrica.

I dati di ingresso del modello rappresentano le classi in cui sono stati suddivisi i parametri utilizzati, per un totale di 28 variabili convertite in sequenze binarie, mentre un indice probabilistico di franosità è stato scelto come variabile unica di uscita (percentuale di area in frana per ogni unità

territoriale omogenea, normalizzata tra 0 ed 1).

Le reti neurali utilizzate sono in grado di identificare la relazione che lega gli *input* e gli *output* ad essi associati, presentati in fase di addestramento (*learning*): i vettori di addestramento costituiscono un sottoinsieme dei dati (*training set*) selezionato da zone con elevata qualità della carta inventario e caratteristiche geologiche e geomorfologiche rappresentative delle condizioni complessive delle Macroaree di competenza.

Dopo la fase di *learning* supervisionato, la rete è in grado di fornire *output* in risposta ad *input* anche diversi da quelli presentati, avendo essa acquisito una capacità di generalizzazione ossia di interpolazione ed estrapolazione sulla base dei dati del *training set*.

Le cinque migliori reti testate, appartenenti alle categorie *Multi Layer Perceptrons (MLP)*, *Radial Basis Functions (RBF)* e *General Regression Neural Networks*

(*GRNN*) (Bishop, 1995), sono state applicate alla totalità dei dati delle Macroaree di competenza; successivamente, i risultati di uscita delle ANN, ottenuti per ogni UTO e compresi tra lo zero (probabilità nulla che all'interno della UTO si verifichi un fenomeno franoso) e il 100%, sono stati riclassificati in termini di livelli di suscettibilità: S0 (suscettibilità nulla), S1 (suscettibilità bassa), S2 (suscettibilità media), S3 (suscettibilità elevata). Ciò è stato possibile diagrammando i valori di uscita della rete, sia per le aree totali che per le aree in frana, in funzione dell'area percentuale cumulata (Fig. 2): i salti verticali osservabili lungo la curva delle frane indicano valori di *output* in corrispondenza dei quali si registra un notevole incremento del numero di pixel in frana e quindi una possibile corrispondenza con valori di soglia (Ermini *et al.*, 2005; Catani *et al.*, 2005).

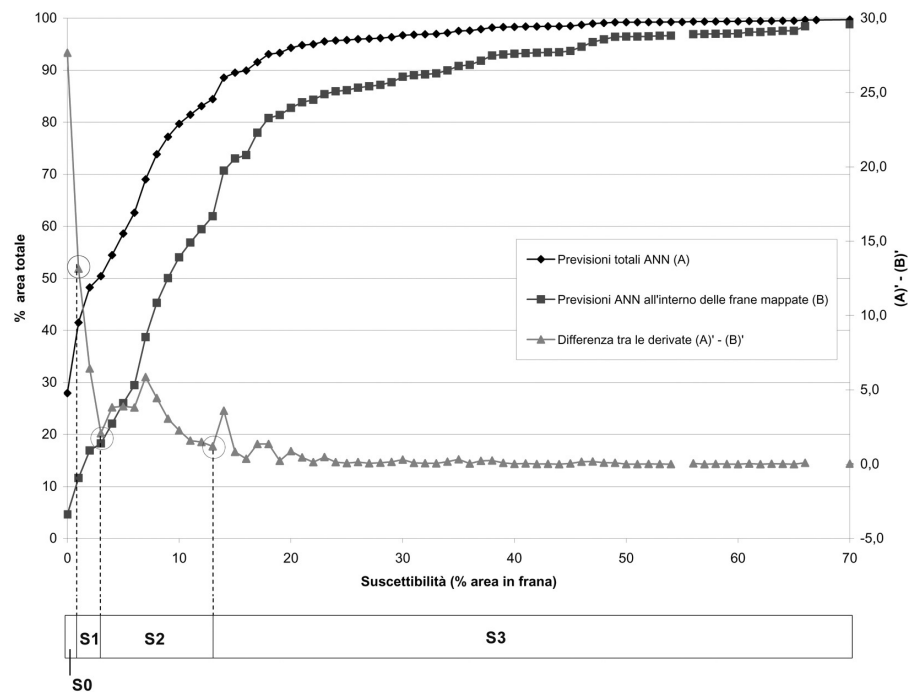


Fig. 2. Definizione dei valori soglia di suscettibilità: la distribuzione cumulativa dei valori di uscita totali della rete neurale (rombi) è confrontata con la distribuzione cumulativa degli *output* nell'ambito delle frane mappate (quadrati) attraverso la differenza tra le derivate prime (triangoli). Le soglie ottimali sono identificate in corrispondenza di bruschi incrementi nella curva di differenza, come indicato in figura (i dati si riferiscono alla Macroarea 2)

*Susceptibility class thresholds definition: the cumulative distribution of the total ANN outputs (diamonds) is compared to the cumulative distribution of the ANN outputs within mapped landslide areas (squares) through the difference between first derivatives (triangles). The optimal class thresholds can be identified at the verge of sudden decreases of the difference curve, as indicated in the figure (plot data refer to Macroarea 2)*

Infine, è stata effettuata l'unione cartografica delle mappe di suscettibilità elaborate per le cinque Macroaree (Fig. 3).

Il confronto fra i valori di suscettibilità predetti dalle reti neurali e quelli osservati (Tab. 1) ha costituito una

procedura di validazione per la misura della qualità e dell'attendibilità dei risultati: in media, circa l'85% dei fenomeni censiti è stato correttamente classificato dalla rete. L'ottimo risultato acquista ancora maggior valore se si considera che alte percentuali delle aree in dissesto

appartengono alla classe di suscettibilità più elevata (S3). Gli errori negativi, o mancati allarmi, corrispondono ad una piccola percentuale dell'area totale del bacino: movimenti di massa non individuati dalle previsioni possono essere dovuti ad una insufficiente conoscenza dei parametri di franosità. Gli errori positivi, o falsi allarmi, risultano di contro molto comuni e sono imputabili a meccanismi di sovrastima degli operatori statistici ovvero ad erronee interpretazioni delle evidenze geomorfologiche durante la fotointerpretazione o i rilevamenti di campagna.

Tab. 1. Tabella riassuntiva di validazione delle ANN nelle cinque Macroaree

*Synthesis table of ANN validation for all Macroaree*

Macroarea	% in S3	% in S2	% frane in S3	% frane in S2	% frane in (S3+S2)
01	7.2	35.2	50.6	43.5	94.1
02	15.5	21.8	81.3	15.3	96.6
03	13.3	6.9	76.9	11.0	87.9
04	15.4	25.0	68.9	22.5	91.4
05	9.5	14.3	57.8	23.7	81.5

E' stata inoltre condotta, per ogni Macroarea, un'analisi di sensitività sui dati di *input* forniti al sistema computazionale neurale, attribuendo un punteggio ad ogni variabile di ingresso in base al deterioramento della performance della rete in caso di esclusione della variabile medesima, al fine di individuare le variabili più influenti all'interno di ogni singolo modello: in particolare, risulta evidente l'importanza della pendenza nel determinare situazioni di instabilità dei versanti.

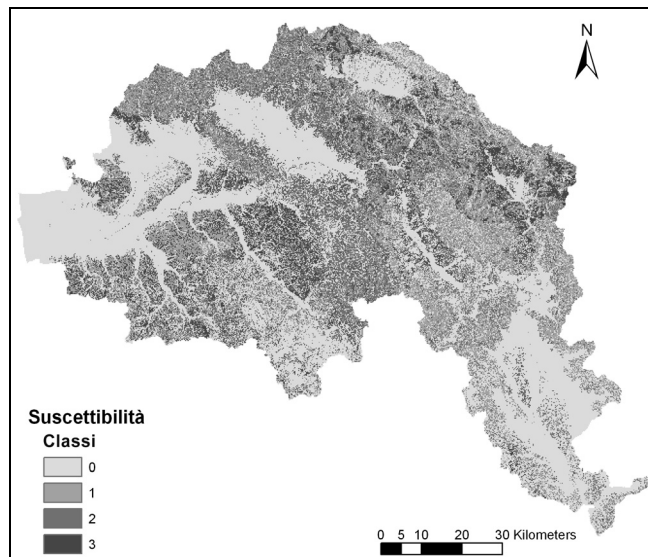


Fig. 3. Carta di suscettibilità da frana per il Bacino del Fiume Arno  
*Landslide susceptibility map of Arno River Basin*

Poiché lo stato di attività attribuito ad ognuno dei fenomeni franosi mappati può essere utilizzato per definire un tempo di ritorno atteso, la carta inventario è stata

sovrapposta alla carta di suscettibilità considerando esclusivamente i fenomeni franosi attivi o quiescenti. La carta derivata è una carta di pericolosità composta da quattro classi di zonazione del territorio, da H0 (pericolosità nulla) attraverso H3 (integrazione di frane quiescenti ed aree caratterizzate dal massimo livello di suscettibilità S3) fino ad H4, costituita dalle sole frane attive.

Ad ogni classe di pericolosità è stato assegnato un tempo di ritorno T sulla base di considerazioni sullo stato di attività, usando come riferimento la distribuzione dei tempi di ritorno riscontrata per le frane del bacino ed i dati di monitoraggio disponibili (10.000 anni per H0; 1000 anni per H1; 100 anni per H2; 10 anni per H3; 1 anno per H4). Infine, è stata applicata la distribuzione binomiale per calcolare la probabilità di occorrenza di un fenomeno franoso con un dato tempo di ritorno in un periodo di N=30, N=20, N=10, N=5, N=2 anni (Fig. 4).

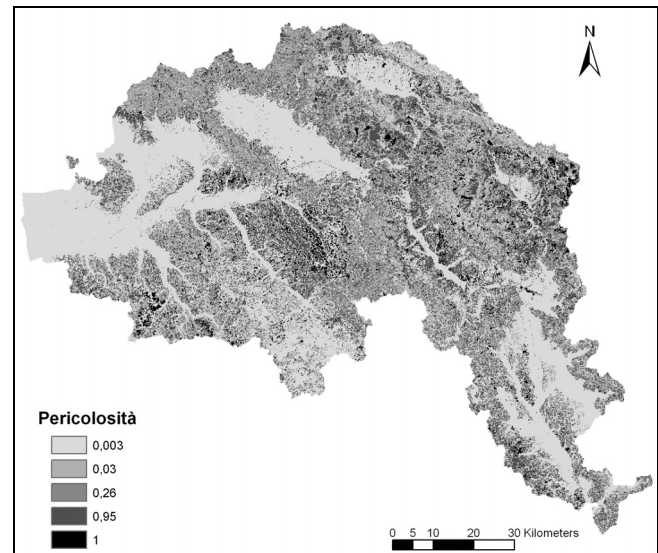


Fig. 4. Carta di pericolosità da frana per il Bacino del fiume Arno. La probabilità di occorrenza è stata calcolata su un periodo di 30 anni con l'ausilio dei tempi di ritorno e della distribuzione binomiale

*Landslide hazard map of Arno River Basin. Probability of occurrence is computed over a 30 year period using recurrence intervals and the binomial distribution*

## 5. Conclusioni

La zonazione della pericolosità da frana a scala di bacino è considerata essenzialmente in termini spaziali (suscettibilità); tuttavia, l'utilizzazione di un inventario con informazioni aggiornate sullo stato di attività risulta utile per la definizione della frequenza di occorrenza, soprattutto in aree caratterizzate da prevalenti fenomeni di riattivazione.

La statistica multivariata implementata in opportune architetture neurali si dimostra molto efficiente nell'attività predittiva, *conditio sine qua non* una elevata qualità e completezza dei dati di partenza. Da questo punto di vista,

notevoli miglioramenti saranno conseguibili con l'adozione della nuova cartografia geologica in scala 1:10.000, attualmente in via di completamento. L'analisi svolta rivela inoltre la presenza di aree ad alta pericolosità prive di frane censite, che indicano presumibilmente zone della carta inventario necessitanti di più approfondite indagini e di ulteriori integrazioni, come dimostrato da successive analisi di campagna e di dati satellitari (progetto ESA-SLAM).

## 6. Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito della collaborazione tra l'Autorità di Bacino del Fiume Arno e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di

Firenze, dal titolo: Programma comune per l'integrazione e l'aggiornamento della cartografia del rischio da frana del Piano di Bacino. Si ringraziano l'Autorità di Bacino del Fiume Arno e il suo Segretario Prof. Giovanni Menduni per il supporto finanziario ed organizzativo al progetto. Si ringraziano inoltre Lorenzo Sulli e Giovanni Montini per il contributo tecnico nella fase di validazione dei risultati.

Parte dei dati presentati deriva dal progetto ESA-SLAM (European Space Agency - Service for Landslide Monitoring).

Si ringrazia l'ESA per averne permesso la pubblicazione.

## Bibliografia

- AA.VV. - Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Istituto di ricerca per la protezione idrogeologica (IRPI-CNR), Gruppo nazionale per la difesa dalle catastrofi idrogeologiche (GNDCI-CNR) e Comitato di parlamentari per l'innovazione tecnologica e lo sviluppo sostenibile (COPIT), 2005. Giornata di studio: "Rischio idraulico-geologico in ambiente costiero: ricerca scientifica e opere di prevenzione", Roma, Sala delle Conferenze di Palazzo Marini, 9 Febbraio 2005.
- AA.VV., 2001. Inner Northern Apennines. Anatomy of an Orogen: the Apennines and Adjacent Mediterranean Basins, Vai G.B. & Martini I.P. eds., 197-214.
- Aleotti, P. & Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspective. *Bull. Eng. Geol. Env.* 58, 21-44.
- Alvarez, W., Coccozza, T. & Wezel, F., 1974. Fragmentation of the Alpine orogenic belt by microplate dispersal. *Nature* 248, 309-314.
- Bianco, G. & Maggi, M., 2000. Prevenire è meglio che curare? Istituto Ricerche Economico-sociali del Piemonte, Working Paper 130, 80 pp.
- Bishop, C., 1995. *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press.
- Boccaletti, M., Elter, P. & Guazzone, G., 1971. Plate tectonic model for the development of the Western Alps and Northern Apennines. *Nature* 234, 108-110.
- Catani, F., Casagli, N., Ermini, L., Righini, G. & Menduni, G., 2005. Landslide hazard and risk mapping at catchment scale in the Arno River Basin. *Landslides* 4 (2), 329-342.
- Cumer, A., 1994. Il progetto CORINE Land Cover in Italia: un modello da seguire. Documenti del Territorio Anno VIII n.28/29 giugno/dicembre 1994.
- Dapporto, S., Falorni, G., Tofani, V. & Vannocci, P., 2003. Analisi delle variazioni di pressione interstiziale alla base dei movimenti franosi durante l'evento del Novembre 2000 in Toscana. Convegno Nazionale "Conservazione dell'ambiente e rischio idrogeologico", Assisi 11-12 Dicembre 2002.
- Ermini, L., Catani, F. & Casagli, N., 2005. Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology* 66, 327-343.
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F., 2001. Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique. Abstracts of the Contributions of the 27th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, France, 25-30 March.
- Heymann, Y., Steenmans, C., Croisille, G. & Bossard, M., 1994. CORINE land cover project - Technical guide. European Commission, Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, ECSC-EEC-EAEC, Brussels- Luxembourg, 136 pp.
- IFRC - The International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies, 2005. *The World Disasters Report 2005-focus on information in disasters*.
- Kligfield, R., 1979. The Northern Apennines as a collisional orogen. *Am. Journ. Sc.* 279, 676-691.
- Pellegrini, M., Bertolini, G. & Tosatti, G., 2001. Le frane della regione Emilia-Romagna, oggetto di interventi di protezione civile nel periodo 1994-1999. *Quaderni di geologia applicata* 8 (1,2).
- Soeters, R. & Van Westen, C.J., 1996. Slope stability: recognition, analysis and zonation. In *Landslides: investigation and mitigation*. Turner AK, Shuster RL (eds), Transportation research board- National research council, Special report 247, pp. 129-177.
- Suzen, M. L. & Doyuran, V., 2004a. A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology* 45, 665-679.
- Suzen, M. L. & Doyuran, V., 2004b. Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Eng. Geol.* 71, 303-321.
- Tarboton, D.G., 1997. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid elevation models. *Water resources research* 28(7), 1897-1910.
- Van Westen, C.J., Rengers, N., Terlien, M.T.J. & Soeters, R., 1997. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau* 86, 404-414.
- Wilson, J.P. & Gallant, J.C. eds, 2000. *Terrain analysis, principles and applications*. Wiley, New York, 479 pp.
- Zeze, J.L., 2002. Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2 (1-2), European Geophysical Society, 73-82.