

L'analisi statistica bivariata in ambiente GIS: un esempio applicato alla valutazione della suscettibilità da frana

Bivariate statistical analysis in GIS environment: a case of application to landslide susceptibility

MELELLI L. (*), TARAMELLI A. (*), NUCCI G. (**)

RIASSUNTO - Valutare la probabilità di accadimento dei movimenti di massa e gli effetti che ne conseguono, significa, in termini tecnico-scientifici, stimarne il grado di suscettibilità, pericolosità e rischio per una determinata area. Il riconoscimento e la perimetrazione delle aree a differente grado di pericolosità, quando siano il risultato dei tradizionali metodi di osservazione e di fotointerpretazione, possono contenere una percentuale d'errore variabile e talvolta consistente (fino all'80%). Questo rende le carte tematiche, derivanti dalle consuete tecniche di rilevamento, estremamente soggettive e non sempre attendibili. La crescente diffusione dei Sistemi Informativi Geografici (GIS) e delle immagini satellitari, ha fornito la possibilità di utilizzare nuovi strumenti, validi sia per il riconoscimento delle forme, che per la perimetrazione, attraverso modelli di analisi spaziale, delle aree soggette a specifici processi morfogenetici.

Il lavoro presenta un esempio di valutazione della suscettibilità da frana applicato al bacino del T. Assino (Umbria) attraverso un modello di analisi statistica bivariata. La carta finale di sintesi è il risultato di complesse operazioni di acquisizione, pre-elaborazione e analisi dei dati territoriali sintetizzabili come di seguito:

- 1) implementazione di un DBR (*Database Relazionale*) dei fattori della franosità dell'area: geologia, uso del suolo, caratteristiche morfometriche e morfologiche significative;
- 2) analisi di un DEM (*Digital Elevation Model*) a 90 m di risoluzione derivato da dati SAR per l'elaborazione degli attributi topografici primari e secondari selezionati;
- 3) individuazione di unità omogenee (UCU);
- 4) determinazione e successiva digitalizzazione in ambiente GIS delle aree in dissesto per comprendere i rapporti spaziali e causativi tra frequenza e distribuzione per ogni fattore predisponente;

5) operazioni di *overlay* dei fattori pesati, per la realizzazione di una cartografia di sintesi con la perimetrazione di aree a grado di pericolosità crescente.

PAROLE CHIAVE: frane, suscettibilità, database, GIS, analisi statistica.

ABSTRACT - Generally, it is important to distinguish between landslide mapping and landslide hazard mapping. The goal of landslide mapping is to map the presence or absence of landslides that have already occurred within a region. However, the goal of landslide hazard mapping is to map the potential for landsliding within a given region, that is, landslides that might occur in the future. Direct mapping of the landslide hazard involves a surveyor interpreting aerial photographs and surveys as well as using field knowledge to map the possible landslide hazard that usually led to an uncertain error (80%).

Ideally, a landslide hazard map should include an indication of the time frame within which a particular landslide is likely to occur. In practice, data on the temporal dimension of the landslide hazard are difficult to obtain, since most studies are usually conducted over a short period of time. Good alternatives to landslide hazard maps are susceptibility maps that are based on the premise that the spatial distribution of landslides are imposed by the intrinsic properties of a region.

The advent of spatial data in the form of Digital Elevation Models (DEM) and their widespread availability have led, during the past several years, to the use of improved tools for landslide management and modelling. The major problem with using GIS to evaluate landslide hazards is the complexity of the hazard-generating phe-

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Perugia, lmelelli@unipg.it, ataram@ldeo.columbia.edu.

(**) Geologo - Libero Professionista, giulionucci@virgilio.it.

nomena which are the result of the interplay of many factors, some of which are known and mappable while the others are known but cannot be effectively digitized. Indirect landslide hazard mapping involves inferring the probability of landsliding through data on related properties and inferring the presence or absence of landslides through observations of related geological and geomorphological properties like slope, aspect and curvature.

In this paper we present an example of landslide susceptibility map using a bivariate statistical analysis applied to the Assino river basin (Umbria, central Italy). This approach makes use of various algorithms to extract and represent different topographic structures from digital elevation data to produce a final output within a several processing steps:

- spatially organize (relational database) and partition (Unique Condition Unit) the surface into physically meaningful units for which the distributions of landslide variables (geology and landcover) and parameters (slope and drainage network) can be estimated and stored;
- SRTM DEM analysis based on a delineation of surface landscape using different delineation algorithms, to identify primary and compound attributes that include drainage patterns, slope and relief;
- assess the accuracy of the landslide spatial distribution by estimating susceptibility to landsliding for the present based on the pre-failure conditions (each single class of each single variables and parameters);
- the predicted susceptibility (that is, the probability of landsliding based only on the intrinsic properties) is then be compared to the landslides that have already occurred while taking into account that the landslide susceptibility map would not match precisely the landslide map (bivariate analysis).

KEYWORDS: landslides, susceptibility, database, GIS, statistical analysis.

1. - INTRODUZIONE

I movimenti di massa e gli effetti che determinano sull'ambiente, ed in particolare sulla componente antropica, sono tra i principali eventi responsabili delle condizioni di pericolosità geomorfologica che compromettono buona parte del territorio nazionale italiano. Tra i primi obiettivi, nello studio dell'innesco e dell'evoluzione di tali processi, vi è l'individuazione delle principali cause di pericolosità ambientale, la valutazione del rischio derivante da alcuni processi naturali, le relative soluzioni per abbassarne l'impatto negativo sulle componenti maggiormente vulnerabili ed esposte del territorio.

La suscettibilità da frana è definibile come la probabilità che tale evento, potenzialmente dannoso, possa verificarsi in una particolare area. Una carta della suscettibilità da frana discretizza arealmente la propensione al dissesto in diverse classi, consentendo una prima fondamentale zonazione areale del territorio, di

cui tenere conto in particolare per eventuali operazioni di pianificazione territoriale.

In molti casi i documenti finali sono il risultato di metodi di analisi euristici qualitativi o semiquantitativi, con un alto grado di soggettività nella scelta e nella valutazione dei parametri condizionanti il processo in esame. Questo, unitamente ad una eventuale scarsa qualità del data base acquisito nella fase d'inventario (in termini di accuratezza temporale e geografica, di precisione semantica, di coerenza logica e congruenza geometrica) porta a risultati contenenti un'alta percentuale di errore.

I parametri di cui tenere conto nella valutazione della suscettibilità da frana sono ben noti in letteratura e non è la loro individuazione il principale obiettivo del presente lavoro. È ancora argomento di discussione al contrario, l'esatta quantificazione dell'influenza (o peso) da attribuire ad ogni classe di ogni singolo parametro per non incorrere in fuorvianti errori di approssimazione. I metodi statistici e gli strumenti informatici possono quantificare, con un giusto grado di precisione, il peso relativo suddividendo ogni parametro in classi, desunte dall'analisi della franosità esistente e attribuendo ad ogni classe un peso, valutato sulla base del dato reale e quindi paragonabile sia tra le diverse classi di un singolo parametro che tra diversi parametri.

È pertanto oggetto di questo lavoro, la valutazione della suscettibilità da frana con metodi statistici quantitativi, per stabilire l'effettiva corrispondenza tra parametri e classi sulla base della franosità esistente. Per l'analisi è stata scelta una *test area* corrispondente al bacino idrografico del T. Assino (Umbria) sulla base delle caratteristiche geologiche geomorfologiche e della disponibilità di data base con buon grado di accuratezza e precisione.

2. - IL BACINO DEL T. ASSINO - INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

L'area oggetto di studio (fig. 1) ricade nel bacino del Torrente Assino, affluente in sinistra del Fiume Tevere, localizzato nella parte nord-orientale dell'Umbria. Il letto del Torrente Assino si sviluppa per una lunghezza di oltre 26 km; presenta una quota media di 558 m (s.l.m.) con portate medie durante l'anno che si aggirano intorno a 1.8 m³/sec.

La zona si estende per 177 km² ed è situata tra la dorsale Umbro-Marchigiana e la piana alluvionale del F. Tevere. Le cime più eleva-

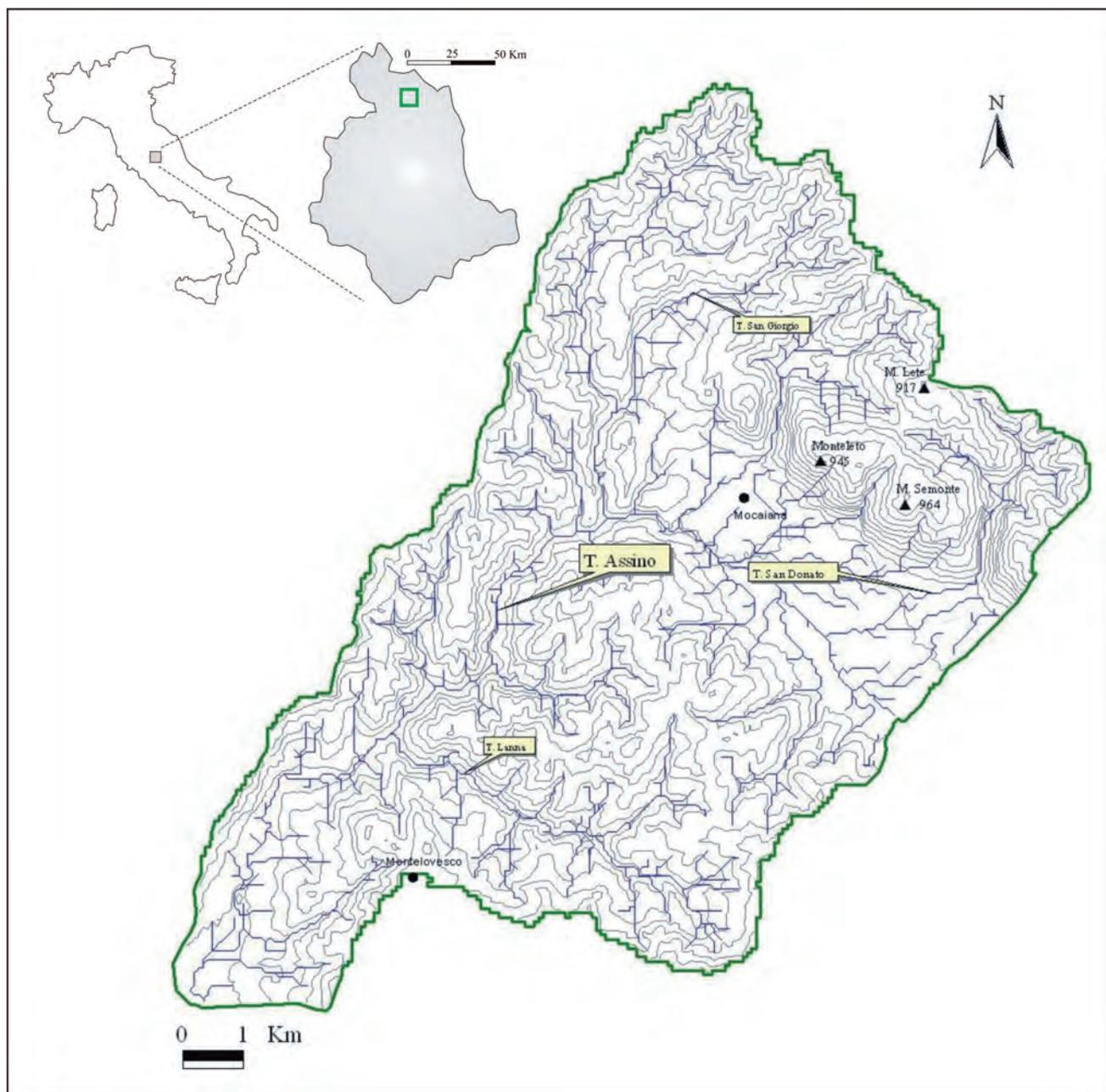


Fig. 1 - Localizzazione dell'area di studio.
- Study area location.

te (superiori ai 900 m) sono localizzabili nella parte nord orientale del bacino, in prossimità della dorsale eugubina, per poi degradare ai 700 m circa della parte settentrionale e sudoccidentale.

L'intera area è attraversata da NE a SO dal T. Assino, che sviluppa il suo corso tagliando ortogonalmente le strutture lungo linee di debolezza tettonica. In esso confluiscono in genere corti e ripidi impluvi, tranne nei casi del T. Lanna, del T. San Giorgio e del T. San Donato, principali affluenti con aste di lunghezza signifi-

ficativa e un alto grado di gerarchizzazione dei singoli interbacini.

Il clima dell'area risulta favorevole, in termini di valori delle precipitazioni (intensità e durata) all'innesco e all'evoluzione dei processi di massa. I valori registrati relativamente al periodo compreso tra il 1920 e il 1997 nelle stazioni limitrofe all'area d'indagine (fig. 2), evidenziano un massimo di precipitazioni nel trimestre che va da ottobre a dicembre, con valori medi che si attestano sui 100 mm di pioggia e con picchi di piovosità, che superano abbondantemente i 120

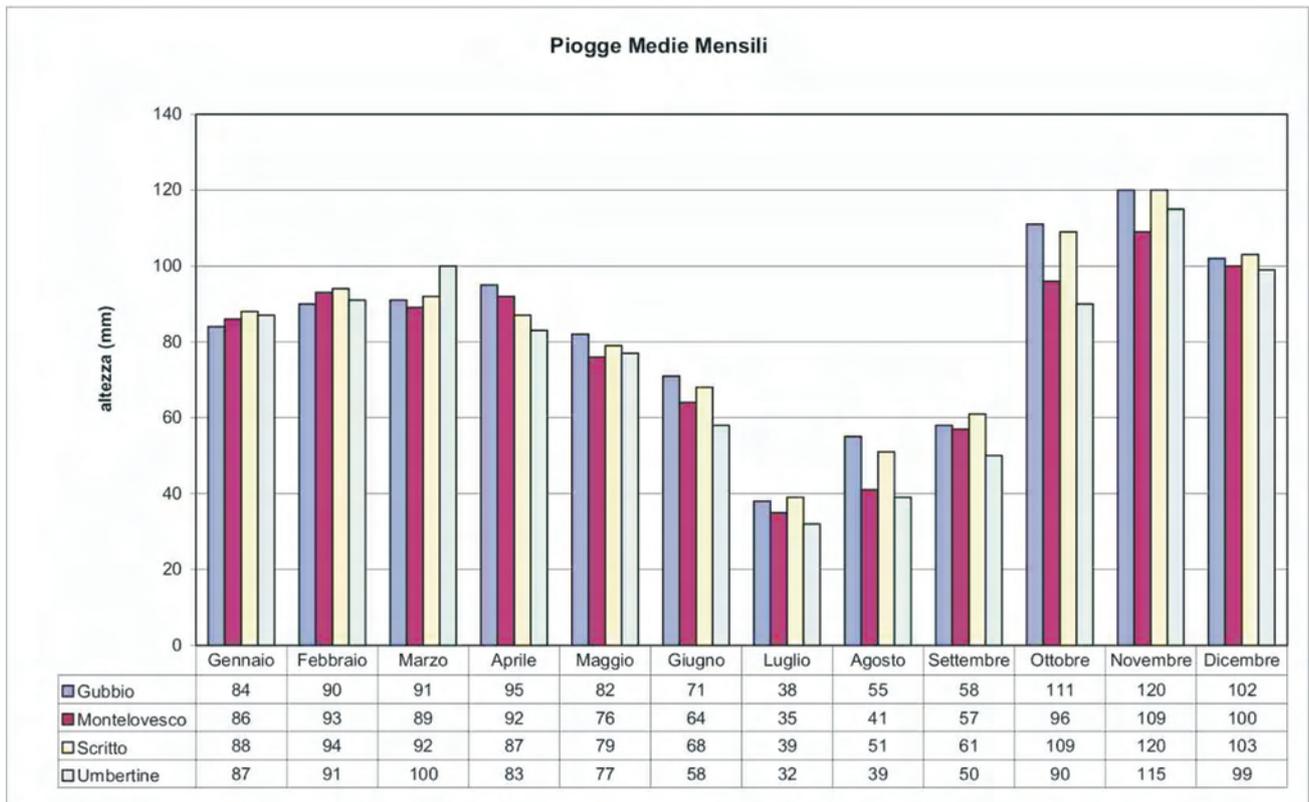


Fig. 2 - Diagramma delle precipitazioni medie mensili, ricavate per gli anni dal 1920 al 1997.
- Bar chart of medium monthly rainfall values from 1929 to 1997.

mm. I valori minimi caratterizzano il periodo estivo con valori che oscillano tra i 32 mm della stazione di Umbertide e i 39 mm registrati a Scritto e con un numero di giorni piovosi piuttosto modesto. Le precipitazioni in questo periodo sono caratterizzate da breve durata e forte intensità. Al contrario, nel periodo che va da settembre a febbraio, la quantità di pioggia (e di neve nelle zone di maggior quota) è più intensa, ma distribuita su un maggior numero di giorni. Relativamente agli eventi meteorici estremi le quantità di pioggia attese sono sintetizzate in tabella 1 per tempi di ritorno (T) di 5, 10, 25, 50 e 75 anni, e come durata delle piogge, per intervalli (d) di 1, 3, 6, 12 e 24 ore.

Il range delle temperature nei mesi invernali è piuttosto ampio (tra 14° e -5° per Umbertide, tra 14° e -8° per Gubbio).

2.1. - CARATTERISTICHE GEOLOGICHE- GEOMORFOLOGICHE

Il pre-Appennino umbro costituisce la parte più interna del dominio strutturale umbromarchigiano (BOCCALETTI *et alii*, 1987). Lo stile deformativo è caratterizzato da strutture plicative e da sovrascorrimenti che hanno uti-

lizzato come piano di scollamento orizzonti ad alta percentuale marnosa. Nell'insieme lo stile deformativo dell'area rimane "di copertura"; formatosi in stadi successivi durante la fase compressiva dal Langhiano al Messiniano. La successiva fase tensionale, risalente al Plio-Pleistocene, è documentata, in questa zona, dalla faglia diretta che borda ad est il bacino di Mocaiana-Gubbio responsabile della formazione del semigraben dell'Assino.

La valle dell'Assino è caratterizzata dalla presenza di una struttura estensionale a domino (fig. 3), costituita da faglie dirette ad alto angolo con direzione appenninica e immersione verso SO, associate ad un sistema di faglie transtensive con direzione N-S e NNE-SSO; che si sovrappone alla serie di pieghe prodotte nella precedente fase compressiva.

Le faglie dirette, con immersione generale verso SO, concordano con la *master fault* del semigraben della conca di Gubbio e con quella della valle del Tevere. Il bacino del T. Assino rientra per la maggior parte nell'ampia regione di terreni a composizione prevalente marnoso-arenacea che si sviluppa sulla riva sinistra del fiume Tevere fino alla ruga interna dell'Appennino Umbro-Marchigiano (fig. 3).

TAB. 1 - Altezze di pioggia prevedibili per valori del tempo di ritorno T .
 - Threshold values of rainfall calculated for return times T values.

T (anni)	hT(d) mm	d (1 ora)	d (3 ore)	d (6 ore)	d (12 ore)	d (24 ore)
5	h5(d)	33,9	44,9	53,6	63,9	76,3
10	h10(d)	39,2	51,9	61,9	73,9	88,2
25	h25(d)	45,9	60,8	72,5	86,6	103,3
50	h50(d)	50,9	67,3	80,3	95,9	114,4
75	h75(d)	53,8	71,1	84,9	101,3	120,9

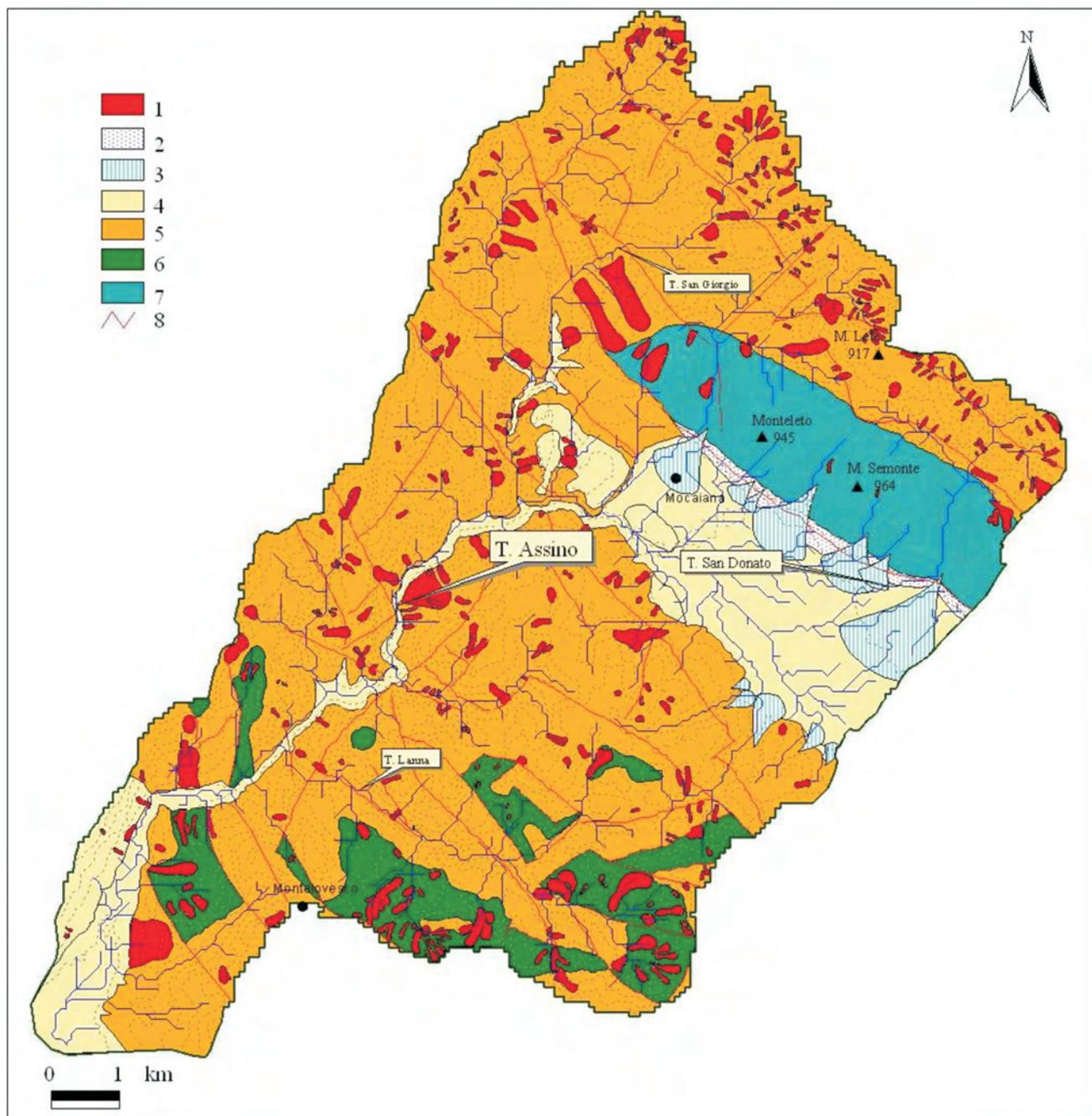


Fig. 3 - Carta degli elementi geologici: 1) aree in frana; 2) detrito; 3) depositi di conoide alluvionale; 4) depositi di origine fluvio-lacustre e alluvionale; 5) formazioni flyschoidi; 6) olistostromi; 7) formazioni prevalentemente calcaree; 8) faglie.
 - Geologic map: 1) landslide areas; 2) talus; 3) alluvial fan deposits; 4) fluvial - lacustrine deposits; 5) flysch formations; 6) olistostromes; 7) limestone formations; 8) faults.



Fig. 4 - a) Esempio di scorrimento in località Valderchia, b) fenomeno di colata nei pressi dell'abitato di Lame.
- a) Slide type mass movement in Valderchia area, b) flow type mass movement in the Lame village.

Le formazioni calcaree più antiche, di ambiente pelagico e appartenenti alla serie umbromarchigiana, affiorano limitatamente a una parte del settore nord-orientale del bacino, lungo la dorsale eugubina. In sequenza si osservano le formazioni flyschoidi e le placche di olistostromi che ricoprono la maggior parte del territorio in esame intensamente piegate e fagliate. Al di sopra di un substrato roccioso essenzialmente omogeneo, se non per le diverse percentuali tra termini argillosi e frazione arenaceo-calcareo litoide, si distinguono terreni di copertura plio-pleistocenici ed attuali, sciolti, eterometrici, organizzati (in particolare lungo il margine nord-orientale della Conca Eugubina) in importanti apparati conoidali e in falde detritiche di raccordo tra i rilievi calcarei e il fondovalle.

Il modellamento superficiale dell'area è strettamente influenzato dall'assetto litologico e strutturale del substrato. Il paesaggio assume forme e caratteristiche differenti a seconda del tipo di terreno su cui si imposta: aspro e accidentato in corrispondenza della dorsale eugubina, dove è predominante la componente calcarea; morfologicamente più dolce nelle aree caratterizzate dalla presenza di litotipi marnoso arenacei dei terreni flyschoidi miocenici, con versanti poco acclivi a piccola scala e localmente più accidentate.

Localmente possono avere luogo fenomeni di erosione molto intensi tali da impedire o per lo meno ostacolare, qualsiasi possibilità di pedogenesi (calanchi). Infine, in corrispondenza dei sedimenti villafranchiani, più facilmente erodibili e modellabili dagli agenti morfogenetici, le pendenze diminuiscono ancora e il modellato superficiale risulta particolarmente blando.

La morfogenesi attuale deriva direttamente dall'azione congiunta dei processi fluviali e gravitativi. Particolarmente vivaci entrambi, nel primo si osserva una sostanziale attività di erosione lineare dei collettori, tanto più diffusa ed efficace quanto maggiore risulta la densità di drenaggio (in particolare nei termini marnosi). La morfogenesi gravitativa si traduce in un'elevata franosità del territorio sia superficiale che profonda. I fenomeni che si impostano nelle aree di affioramento della Marnoso-Arenacea, coinvolgono per lo più la copertura eluviale, con episodi meno frequenti che interessano spessori maggiori, al passaggio tra la coltre e la roccia in posto. La parte del bacino costituita da formazioni appartenenti alla serie carbonatica risulta generalmente stabile, si verificano unicamente limitati episodi di crollo.

Sono stati censiti 386 fenomeni franosi di cui ben il 77% risulta classificabile come scorrimenti (CARRARA *et alii*, 1985; VARNES, 1978)

(fig. 4a), il 7% come colate (CARRARA *et alii*, 1985; VARNES, 1978) (fig. 4b), il 15% come fenomeni superficiali (soliflusso e creep) e solo l'1% come crolli (CARRARA *et alii*, 1985; VARNES, 1978), evidenziando la sostanziale omogeneità della franosità nell'area. Scorrimenti e colamenti interessano esclusivamente il complesso litologico flyschoidale e, in particolare, il basamento costituito dagli olistostromi che si intercalano frequentemente nelle unità flyschoidi s.s. Si tratta per lo più di fenomeni contraddistinti da una buona estensione areale ma che raramente raggiungono profondità considerevoli.

3. - METODOLOGIA

Negli ultimi anni nuovi metodi per l'analisi dei processi morfogenetici stanno supportando o, in alcuni casi, sostituendo, i tradizionali procedimenti di studio nelle discipline geologiche. Tra questi i GIS (acronimo che sta per Sistemi Informativi Geografici) sono ormai i più diffusi strumenti per la catalogazione, l'analisi, la visualizzazione e la restituzione dei dati territoriali. Il GIS è definibile come "un sistema di database in cui la maggior parte dei dati sono indicizzati spazialmente e con cui un set di procedure opera al fine di dare risposta a domande relative ad entità spaziali". Nel metodo statistico (o probabilistico) il peso di ciascun fattore viene determinato sulla base della distribuzione areale dei movimenti passati e presenti. Tra i diversi metodi di calcolo esistenti in letteratura (CARRARA & GUZZETTI, 1995), è stato scelto quello bivariato, tra i più idonei all'utilizzo con strumenti GIS operanti su base *raster*, per la combinazione accettabile di sistemi di cartografia diretta, basati sulla soggettività del rilevatore, e capacità oggettive ed analitiche dei GIS per il trattamento dei dati. L'analisi bivariata assegna un "peso" a ciascun parametro segnalato come "fattore predisponente" (AMANTI *et alii*, 1992), permettendo di far interagire tra loro, tramite formule statistiche, i parametri stessi con i propri "pesi" in modo da evidenziare l'instabilità potenziale di un versante su base probabilistica. Pertanto, la propensione al dissesto di un versante può essere determinata dall'osservazione dell'intero territorio che si trova nelle stesse condizioni predisponenti (fig. 5).

La tecnica è basata sul teorema di BAYES secondo il quale ciascuna "frequenza" può essere utilizzata per calcolare le probabilità del verificarsi di un evento futuro. Può essere assimilata ad una "frequenza" la densità di frana,

rappresentata dal rapporto tra le aree in frana e l'area complessiva del territorio analizzato. Per l'applicazione del metodo risulta basilare l'individuazione di zone (ricadenti all'interno di bacini con buone condizioni predisponenti e determinanti o *test-area*) con caratteristiche comuni UCU (*Unique-Condition Units*). Per ciascuna UCU, la frequenza delle frane (LF - Landslide Frequency) viene semplicemente calcolata come:

$$E = \frac{\text{area_Frana}}{\text{area_UCU}}$$

Conseguentemente, le probabilità (P) riguardanti l'intera area studiata (ER) è calcolabile come:

$$P = \frac{\text{area_FRANE}}{\text{area_totale(R)}}$$

Con alcune varianti, questo approccio è stato utilizzato e testato da molti altri rilevatori (BORTOLAMI *et alii*, 1994; TARAMELLI *et alii* 2003; VAN WESTEN, 1998).

Per il bacino del T. Assino è stato utilizzato il modello proposto da CHUNG & FABBRI (1993) e BONHAM-CARTER (1994), testato da NARANJO *et alii* (1994). Il modello propone che il "peso" (W), per ogni classe di parametri sia definito dalla differenza, in valore assoluto, tra la densità degli accumuli della classe in esame, e la densità degli accumuli di una classe rispetto agli accumuli totali.

$$Wfi = |Y - X|$$

Dove:

W = peso da assegnare alla i-esima classe del fattore f considerato,

Y = A_{fi}/A_i dove A_{fi} è il valore dell'area in frana dell'i-esima classe e A_i è il valore dell'area occupata dalla i-esima classe.

X = A_f/A_f dove A_f è il valore dell'area totale in frana.

Tutti i valori si ottengono tramite specifiche funzioni dei sistemi GIS che permettono di "sovrapporre" (*overlay*) ed "incrociare" (*intersect*) i tematismi corrispondente alla franosità censita, con gli altri tematismi corrispondenti ai fattori predisponenti, ottenendo così i valori dei *pixel* di volta in volta interessati da frana per ogni

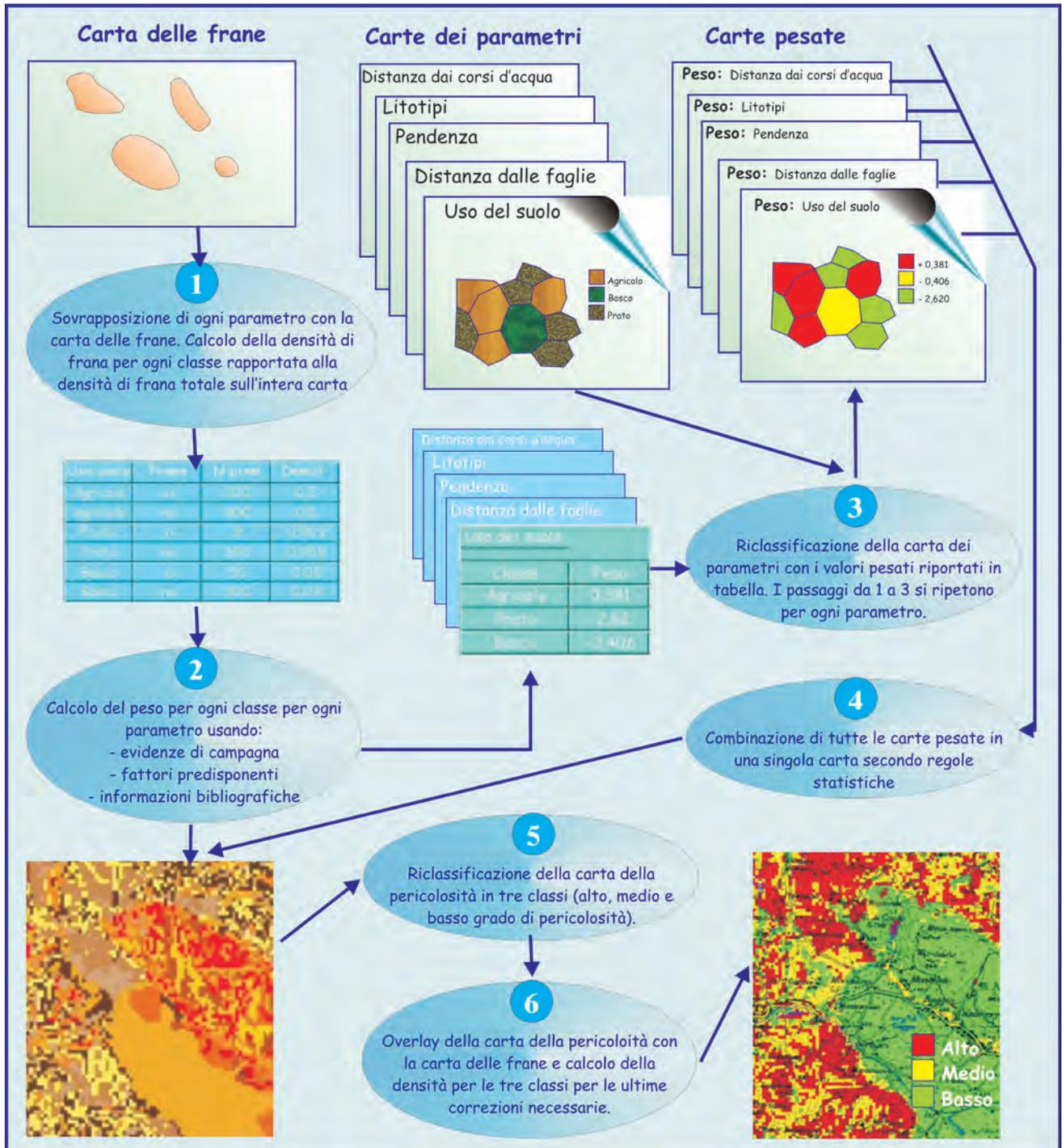


Fig. 5 - Schema riassuntivo del procedimento di calcolo per la realizzazione di un'analisi statistica bivariata.
 - Flow chart showing the bivariate statistical analysis.

classe, di ciascun parametro. Questi stessi valori numerici consentono di calcolare il peso relativo di ogni classe. La somma dei diversi "pesi" (W) derivanti dall'incrocio con tutti i fattori selezionati, consente la produzione di una carta dell'instabilità potenziale dei versanti in cui alti valori rappresentano alte probabilità di movi-

mento del versante. Per verificare la correlazione esistente tra le frane ed il singolo parametro in esame il metodo prevede l'utilizzo di regressioni tra le due variabili con una correlazione positiva tra R^2 e la validità del dato immesso. Gli step essenziali di ogni metodo quantitativo prevedono almeno cinque fasi:

- 1) la produzione di una carta della franosità esistente;
- 2) il riconoscimento delle cause predisponenti e determinanti la franosità dell'area;
- 3) l'individuazione della "UCU" (o unità cartografabile o dominio omogeneo) cioè di una porzione della superficie terrestre caratterizzata da una serie di condizioni al contorno omogenee che differiscono da quelle delle unità adiacenti. Tali differenze sono delimitabili da precisi confini che separano le diverse unità;
- 4) l'assegnazione dei pesi a ciascun fattore predisponente per mezzo di procedure oggettive e analisi algebriche;
- 5) l'uso di modelli matematici per la determinazione delle classi di pericolosità.

3.1. - ACQUISIZIONE DEI DATI

La fase di acquisizione e di pre-elaborazione dei dati richiede particolare attenzione perché eventuali approssimazioni nell'accuratezza del dato e nella sua localizzazione spaziale si traducono, ad ogni passaggio, in un incremento esponenziale della percentuale di errore in grado di limitare l'efficacia del modello e dei documenti di sintesi. Vengono di seguito elencati i tematismi di acquisizione:

- 1) Una carta della franosità attuale, a scala 1:25.000, derivata da letteratura (GUZZETTI & CARDINALI, 1990), da fotointerpretazione e da rilevamenti di campagna. La perimetrazione areale (aree in frana) è stata comprensiva delle zone di coronamento, della testata principale, della massa in movimento e dei corpi di accumulo al fine di avere, in fase di overlay, areali significativi in termini di parametri corrispondenti. La limitazione ai soli corpi di frana infatti avrebbe sottostimato alcuni parametri, come ad esempio i valori delle pendenze significative nelle aree di interesse o le coperture di uso del suolo che interessavano le aree di alimentazione dei movimenti gravitativi. Il tematismo è stato implementato nel sistema GIS come layer vettoriale con struttura poligonale. Nel *database*, ad ogni evento inserito sono state associate informazioni sulla tipologia del movimento, l'area ed il perimetro di ogni evento. In considerazione dell'elevato numero di scivolamenti, questa tipologia di frana è stata scelta per la selezione dei fattori predisponenti da acquisire in seguito. Le aree in frana derivanti da diversi meccanismi sono state comunque inserite nel conto dei *pixel*, durante i successivi processi di analisi, perché derivanti comunque da morfogenesi gravitati-

va e perché, nella stima totale dell'area considerata, non costituiscono una fonte di errore apprezzabile.

- 2) Una carta geologica in formato vettoriale - poligonale per le formazioni affioranti e vettoriale - lineare per le principali discontinuità tettoniche suddivise per cinematismo (faglie dirette, inverse e trascorrenti).

- 3) Una carta dell'uso del suolo derivata dalla semplificazione (ottenuta per accorpamento e semplificazione) delle classi di uso del suolo inserite nel progetto *Corine Land Cover* del 1993 in formato vettoriale - poligonale.

- 4) Un DEM (*Digital Elevation Model*) costituito da un seminato di celle a maglia regolare, con 90 m di lato, derivato da dati radar (SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*). Il modello è una rappresentazione reale del territorio ed è pertanto privo degli errori derivanti da digitalizzazione di CdL (Curve di Livello). La risoluzione a 90 m, sebbene non particolarmente alta, è stata ritenuta concorde con le dimensioni significative dei fenomeni franosi accertati. La gran parte degli scivolamenti infatti, presenta alti valori areali e basse profondità, eliminando nella risoluzione a 90 m il problema del minimo elemento rappresentabile.

3.2 - ANALISI DEI DATI

I tematismi implementati nella fase di acquisizione sono stati preelaborati uniformando il sistema cartografico di riferimento (Gauss Boaga - Roma 40 - Fuso Est). Successivamente, per svolgere le necessarie operazioni di *map algebra* per il calcolo statistico, ogni tematismo è stato convertito in formato raster con maglie concordi alla risoluzione del DEM (90 m). Dal DEM sono stati elaborati due ulteriori tematismi:

- 1) una carta delle acclività riclassificata in 6 classi secondo i seguenti intervalli (1 - $<5^\circ$; 2 - $5^\circ-10^\circ$; 3 - $10^\circ-15^\circ$; 4 - $15^\circ-20^\circ$; 5 - $20^\circ-30^\circ$; 6 - $30^\circ-45^\circ$);

- 2) un tematismo ottenuto da operazioni di buffer sulle linee di impluvio con distanze progressive di 30 m, 100 m e maggiore di 100 m. La medesima operazione è stata ripetuta per le discontinuità tettoniche. La bufferizzazione ha consentito di trasportare i tematismi vettoriali - lineari in tematismi areali e di differenziare le classi di propensione al dissesto (con grado inversamente proporzionale alla distanza dall'elemento lineare). Entrambi i tematismi sono stati assunti come fattori predisponen-

ti per la prevalente azione erosiva della rete di drenaggio superficiale e per le più scendenti caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso in prossimità di zone di faglia.

In figura 6 sono illustrati alcuni dei tematismi utilizzati nelle operazioni finali di calcolo di densità di frana. Le tabelle 2, 3, 4 riportano

i calcoli effettuati incrociando il numero di *pixel* in frana con ogni classe di ciascun parametro considerato per litotipo, uso del suolo e pendenza.

Per ogni parametro le analisi di regressione lineare hanno verificato l'effettiva corrispondenza tra classi e propensione al dissesto, ot-

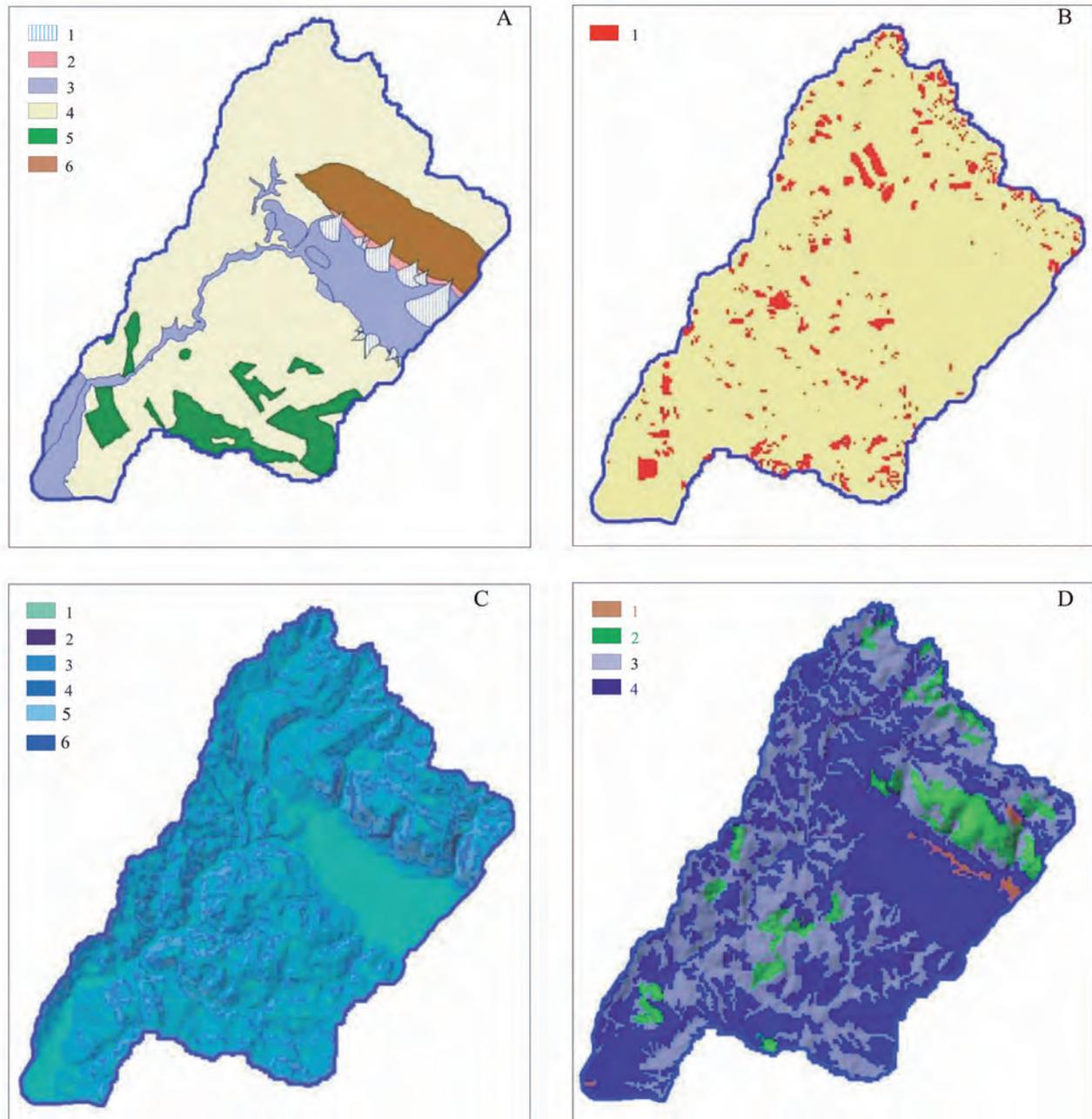


Fig. 6 - Alcuni dei tematismi in formato grid, utilizzati per le operazioni di analisi. A) 1-Depositi di conoide; 2 - depositi detritici, 3 - depositi fluvio-lacustri e alluvionali; 4 - formazioni flyschoidi; 5 - olistostromi; 6 - Formazioni calcaree. B) 1 - Aree in frana. C) 1 < 5°, 2 - 5°-10°, 3 - 10°-15°, 4 - 15°-20°, 5 - 20°-30°, 6 - 30°-45°. D) 1 - Aree antropizzate; 2 - aree a pascolo; 3 - aree a bosco; 4 - aree agricole.

- Grid themes applied in the analysis. A) 1 - Alluvial fan deposits; 2 - talus deposits; 3 - fluvial-lacustrine and alluvial deposits; 4 - flysch formations; 5 - olistostrome; 6 - limestone formation. B) 1 - Landslides areas. C) 1 < 5°, 2 - 5°-10°, 3 - 10°-15°, 4 - 15°-20°, 5 - 20°-30°, 6 - 30°-45°. D) 1 - Urban areas; 2 - herbaceous cover; 3 - tree cover; 4 - cultivated areas.

TAB. 2 – Valutazione del peso per ciascuna classe del tematismo relativo ai litotipi affioranti nel bacino.
 – Table showing a calculated weight value for each class of lithotype within the basin.

Classe di litotipi	N. di pixel: depositi in frana in ogni classe di litotipo	N. di pixel: classi di litotipo nel bacino	Dens Clas	Dens Map	W	Peso
Detrito	0	143	0,00	0,00	0,000	1
Conoidi	0	622	0,00	0,00	0,000	2
Calcarea	70	1767	0,04	0,05	0,008	3
Depositi	39	2918	0,01	0,03	0,013	4
Olistostromi	288	1833	0,16	0,20	0,040	5
M. arenacea	1067	14479	0,07	0,73	0,655	6

TAB. 3 – Valutazione del peso per ciascuna classe del tematismo relativo all'uso del suolo presente nel bacino.
 – Table showing a calculated weight value for each class of land use class within the basin.

Classi di uso del suolo	N. di pixel: depositi in frana in ogni classe di uso del suolo	N. di pixel: classi di uso del suolo nel bacino	Dens Clas	Dens Map	W	Peso
aree urbane	0	207	0,00	0,00	0,000	1
aree agricole	866	11790	0,07	0,59	0,518	4
aree a bosco	466	8094	0,06	0,32	0,261	3
aree a pascolo	132	1652	0,08	0,09	0,010	2

TAB. 4 – Valutazione del peso per ciascuna classe del tematismi relativo ai valori di pendenza presenti nel bacino.
 – Table showing a calculated weight value for each class of slope range degree within the basin.

Classi di pendenza	N. di pixel: depositi in frana in ogni classe di pendenza	N. di pixel: classi di pendenza nel bacino	Dens Clas	Dens Map	W	Peso
0-5	85	3993	0,02	0,06	0,037	3
5-10	522	5901	0,09	0,36	0,268	6
10-15	478	5628	0,08	0,33	0,242	5
15-20	247	3705	0,07	0,17	0,102	4
20-30	126	2225	0,06	0,09	0,029	2
30-45	6	291	0,02	0,00	0,017	1

tenendo valori di R^2 pari a 0,9347 per i litotipi, 0,746 per l'uso del suolo e 0,7847 per le acclività. Riclassificando tutti i tematismi di *input* secondo i pesi ottenuti dalle operazioni di calcolo statistico e “sommando” gli stessi per *overlay*, dopo opportuna riclassificazione in tre classi, è stata ottenuta una carta della suscettibilità da frana (fig. 7).

Le percentuali delle diverse zone, mostrano

che circa 74 km² presentano una bassa propensione al dissesto, 56 km² intermedia e i rimanenti 46 km² alta. Com'è logico aspettarsi per la tipologia di frana considerata nell'analisi, anche il complesso calcareao risulta con bassa propensione al dissesto verificandosi scivolamenti e colamenti per la maggior parte sui terreni flyschoidi ed in particolare sui complessi olistostromici a causa dell'alto contenuto

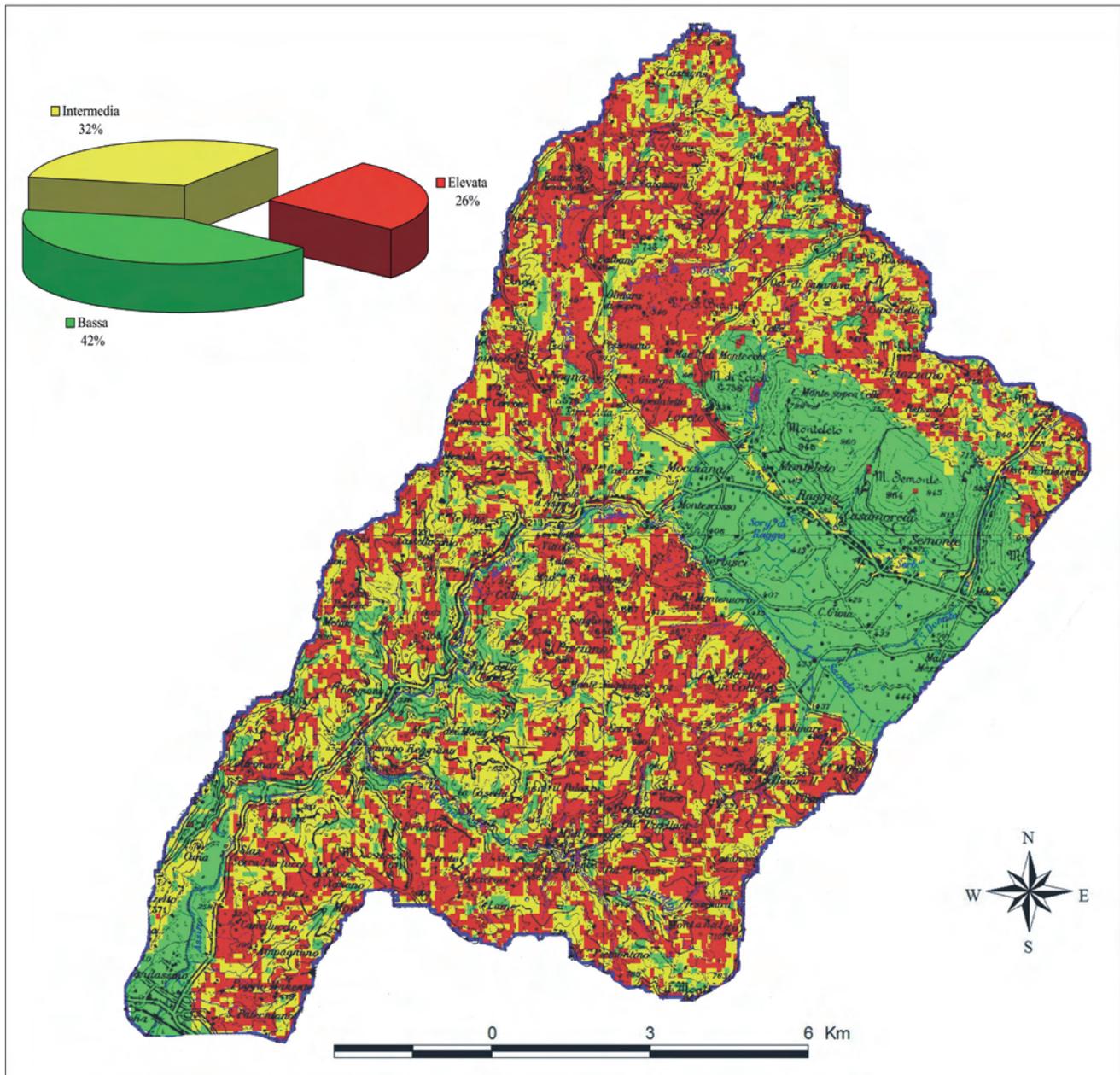


Fig. 7 – Carta finale di sintesi della suscettibilità da frana.
– Final landslide susceptibility map.

argilloso. Inoltre la dorsale calcarea presente all'interno del bacino del T. Assino è, lungo i versanti più acclivi, praticamente per intero ricoperta a bosco rendendo sfavorevoli le condizioni predisponenti al franamento.

4. - CONCLUSIONI

L'alta franosità che affligge il centro Italia e la regione Umbria in particolare, è la causa prima delle condizioni di dissesto idrogeolo-

gico che condizionano pesantemente le scelte strategiche e operative di pianificazione territoriale. Per un corretto uso del territorio non è possibile, fatta eccezione per poche fortunate aree, prescindere da una corretta valutazione della propensione al dissesto.

Il lavoro vuole essere un tentativo di valutazione della suscettibilità da frana nel bacino idrografico del T. Assino (Umbria), selezionato per l'elevata franosità e per la sostanziale omogeneità della tipologia dei fenomeni franosi censiti (77% scorrimenti con prevalente

cinematismo planare). Il metodo utilizzato si è basato su un'analisi statistica bivariata considerata un buon compromesso tra scelte soggettive dell'operatore e dati oggettivi derivanti da calcoli statistici. Il metodo prevede l'implementazione, in un sistema GIS, di diversi tematismi scelti tra i fattori predisponenti i fenomeni di dissesto. L'incrocio, per operazioni di *map algebra*, dei dati in formato *raster*, tra le singole classi dei diversi tematismi, e la carta dei fenomeni franosi esistenti, consente l'attribuzione alle stesse di pesi "ragionati" e non frutto di valutazioni personali spesso affette da errori. I risultati consentono di ottenere un documento finale che visualizza e perimetra aree con bassa media e alta propensione al dissesto. I vantaggi più evidenti dell'utilizzo dei sistemi GIS in problemi di analisi spaziale risultano essere:

- 1) il passaggio da metodi "soggettivi" di valutazione a metodi "oggettivi". I parametri vengono infatti "pesati" sulla base della franosità esistente e non su considerazioni soggettive,
- 2) la creazione di una banca dati aggiornabile e consultabile in tempo reale con la possibilità di restituzioni cartografiche a diversa scala e con differenti vesti grafiche,
- 3) l'opportunità di avere dati territoriali georeferenziati che costituiscono un sistema "aperto" a future implementazioni per successive analisi.

BIBLIOGRAFIA

- AMANTI M., CARRARA A., CASTALDO G., COLOSIMO P., GISOTTI G., GOVI M., MARCHIONNA G., NARDI R., PANIZZA M., PECCI M., & VIANELLO G. (1992) - *Linee guida per la realizzazione di una cartografia della pericolosità geologica connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti alla scala 1:50.000*. Progetto CARG, Presidenza del Consiglio dei Ministri. Servizio Geologico: pp. 53, Roma.
- BOCCALETTI M., CALAMITA F., CENTAMORE E., CHIOCCINO U., DEIANA G., MICARELLI A., MORATTI G. & POTETTI M. (1987) - *Evoluzione dell'Appennino toscano-umbro-marchigiano durante il Neogene*. *Giorn. Geol.*, **48** (1-2): 227-233.
- BONHAM-CARTER G.F. (1994) - *Geographic information systems for geoscientists; modelling with GIS*. *Computer Methods in Geosciences*, **13**: pp. 398.
- BORTOLAMI G., ANTONINETTI M., DE VITO C., IABICHINO G., TARTARI G. & VALSECCHI S. (1994) - *Geographic information system of the Khumbu valley (Himalayas, Nepal): integration of remote sensing data with the data collected during the ev-k2-cnr project expeditions*. 3rd Int. Symp. on High Mountain Remote Sensing Cartography, 7-13 Nov., Mendoza, Argentina: pp. 68-77.
- CARDINALI M., GALLI M., GUZZETTI F., REICHENBACH P. & BORRI G. (1994) - *Relazione tra movimenti di versante e fenomeni tettonici nel bacino del torrente Carpina (Umbria settentrionale)*. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, **17**: 3-17.
- CARRARA A., D'ELIA B. & SEMENZA E. (1985) - *Classificazione e nomenclatura dei fenomeni franosi*. *Geol. Appl. Idrogeol.*, Bari, **20** (2): 223-243.
- CARRARA A. & GUZZETTI F. (Eds.) (1995) - *Geographical Information Systems in assessing natural hazards*, pp. 342, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
- CHUNG C.F. & FABBRI, A.G. (1993) - *The representation of geoscience information for data integration*. *Non-renewable Resources*, **2** (2): 122-139.
- GUZZETTI F. & CARDINALI M. (1990) - *Landslide inventory map of the Umbria region, central Italy*. ALPS 90 Proceedings 6th ICFL, Milano, September 12th, 1990: pp. 273-284.
- NARANJO J.L., WESTEN C.J. VAN & SOETERS R. (1994) - *Evaluating the use of training areas in bivariate statistical landslide hazard analysis - a case study in Colombia*. *ITC Journal*, **3**: 292-300, Enschede, 1994.
- TARAMELLI A., MELELLI L., CATTUTO C. & GREGORI L. (2003) - *Debris flow hazard migration using GIS: an example in the F. Menotre Basin (central Italy)*. Int. Conference on: "Fast Slope Movements - Prediction and Prevention for Risk Mitigation", vol. 1, Naples, May 11-13: pp. 485-490.
- VAN WESTEN C.J. (1993) - *Application of Geographical Information System to landslide hazard zonation*. ITC Publ. n. 15: pp. 245, Enschede, The Netherlands.
- VARNES D.J. (1978) - *Slope movements types and processes*. In: R.L. SCHUSTER & R.J. KRIZECK (Eds.): "Landslides: analysis and control". *Transp. Res. Board, Spec. Rep.*, 176, Nat. Sci. Acad.: pp. 11-33, Washington D.C.