

Proposte per rappresentare la suscettibilità del territorio al dissesto geo-idrologico

Proposals to represent the susceptibility of the territory to geo-hydrological instability

Parole chiave: cartografia, pericolosità geo-idrologica, frane, alluvioni
Key words: mapping, geo-hydrologic hazard, landslides, floods

Battista Taboni

Università degli Studi di Torino,
Vicepresidente SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: battista.taboni@unito.it

Mauro Bonasera

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale ISPRA
E-mail: mauro.bonasera@isprambiente.it

Annalisa Bove

Geologo, Libero Professionista,
Presidente SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: annalisa.bove@geologiapiemonte.it

Gessica Umili

Università degli Studi di Torino,
Segretario SIGEA-APS Piemonte-VdA
E-mail: gessica.umili@unito.it

Luciano Masciocco

Università degli Studi di Torino,
Consigliere nazionale SIGEA-APS
E-mail: luciano.masciocco@unito.it

1. PREMESSA

Nel presente lavoro vengono fornite alcune indicazioni generali per rappresentare la suscettibilità del territorio al dissesto idrogeologico con la speranza che le direttive che regolano questa materia di stringente attualità diventino chiare, di semplice attuabilità e omogenee su tutto il territorio nazionale o addirittura comunitario, come già auspicato in altri contesti da alcuni degli Autori (Gisotti *et al.*, 2107; Bove & Masciocco, 2020a; Bove & Masciocco, 2020b).

2. LA SUSCETTIBILITÀ DEL TERRITORIO ALLE FRANE

Da almeno mezzo secolo, sono stati proposti numerosi metodi per la valutazione della suscettibilità del territorio alle frane, anzi, alle diverse tipologie di frana: frane superficiali, frane profonde e, tra queste, crolli, ribaltamenti, scivolamenti, flussi, etc. (per una rassegna esaustiva cfr. Guzzetti *et al.*, 1999; Guzzetti *et al.*, 2005; Rossi *et al.*, 2010).

Al fine di applicare tali metodi si dovrebbero prendere in considerazione i parametri dai quali essenzialmente dipende l'attitudine di una massa di terreno a franare (Benini, 1970):

- costituzione geologica (composizione litologica, struttura, giacitura degli strati);
- configurazione topografica (essenzialmente la pendenza);
- condizioni climatiche (principalmente le piogge; si è visto infatti come l'acqua influisca sui valori della coesione e del coefficiente d'attrito);
- copertura vegetale (per gli effetti di rinsaldamento, protezione, assorbimento di acqua dal terreno delle formazioni vegetali).

Inoltre bisogna considerare le circostanze che modificano l'equilibrio della massa di terreno:

a) *aumento del peso*, che può essere provocato in vario modo:

- aumento del peso specifico di uno strato di terreno per effetto della sua imbibizione. Infatti un terreno asciutto può avere un peso specifico di 1300 - 1500 kg/m³, un terreno bagnato 1700 - 1800 kg/m³;
- aumento di peso dovuto ad un sovraccarico naturale per effetto di materiale detritico (alluvionale, di frana superiore, ecc.) o di neve di valanga (o di nevicata eccezionale), che si è accumulato sopra lo strato di terreno in esame;
- aumento di peso causato dalla costruzione di fabbricati, manufatti, discariche artificiali, ecc.;

b) *aumento dell'inclinazione dello strato di terreno*, che può essere dovuto a varie cause, tra cui:

- erosione del piede di un pendio provocato da un torrente;
- scavi o rilevati per la realizzazione di una strada (o un canale) a mezza costa;

c) *variazioni delle caratteristiche geotecniche del terreno, e in particolare della coesione e dell'angolo di attrito*:

- come è già stato detto precedentemente è l'acqua la causa principale che riduce i valori di queste caratteristiche meccaniche del terreno.

Le cause che provocano queste variazioni sono numerose, alcune naturali, altre indotte dall'uomo. Inoltre alcune cause sono preparatorie (ad esempio il

disboscamento), cioè predispongono le condizioni favorevoli al verificarsi delle frane, che però si verificano quando altre cause (determinanti) rompono l'equilibrio. Spesso non è una sola causa a provocare il franamento, ma vi è il concorso di più d'una.

Si riporta di seguito un elenco, predisposto dal Desio (1973), che si ritiene abbastanza completo:

Cause preparatorie: fattori naturali

- a) condizioni climatiche: piovosità, insolazione, escursioni termiche;
- b) configurazione morfologica e, soprattutto, inclinazione del pendio e sue variazioni;
- c) composizione geolitologica;
- d) struttura tettonica e in particolare disposizione degli strati rispetto al pendio (franapoggio, reggipoggio ecc.);
- e) microsismi e terremoti dei gradi più bassi;
- f) movimenti orogenici;
- g) rilassamento delle tensioni interne delle rocce;
- h) alterazione meteorica delle rocce;
- i) circolazione delle acque superficiali e sotterranee;
- l) azione erosiva dei corsi d'acqua e del moto ondoso al piede dei pendii;
- m) variazioni di livello dei laghi;
- n) ritiro di ghiacciai;

Cause preparatorie: fattori antropici

- a) disboscamento;
- b) scavi di ogni genere, come trincee, canali, strade a mezza costa, gallerie ecc.;
- c) costruzione di edifici sui pendii;
- d) vibrazioni prodotte dal passaggio di veicoli pesanti (treni, autocarri, ecc.);
- e) irrigazioni;
- f) abbandono della manutenzione dei campi in aree montane e collinari.

Cause determinanti: fattori naturali

- particolari eventi meteorologici come precipitazioni eccezionali, sgelo improvviso;
- rapido scalzamento di ripe fluviali e marine per piene straordinarie dei corsi d'acqua e per mareggiate;
- terremoti;
- sovraccarichi improvvisi per caduta di massi, di valanghe o di materiali alluvionali ad opera di una alluvione localizzata.

Cause determinanti: fattori antropici

- variazioni artificiali del livello di laghi e dei serbatoi;
- perdite d'acqua dall'alveo di canali, acquedotti ecc.;
- apertura di cave, di trincee e di gallerie;
- esplosione di mine;
- costruzioni sul ciglio delle scarpate.

Pragmaticamente, Desio conclude che non si può distinguere rigidamente tra cause preparatorie e cause determinanti, perché uno stesso fattore può agire con un'azione preparatoria alla

frana quando i coefficienti di sicurezza sono sufficientemente elevati, ed agire invece in modo determinante quando stanno per essere superate le condizioni di equilibrio, e che quindi sono cause determinanti anche le cause preparatorie quando agiscono in condizioni di equilibrio critico.

3 - PROPOSTE PER RAPPRESENTARE LA SUSCETTIBILITÀ AI FENOMENI FRANOSI

A più di 30 anni dall'entrata in vigore della normativa sulla difesa del suolo (Legge 183/1989), per avere un'idea della suscettibilità del nostro territorio ai fenomeni franosi è attualmente a disposizione la carta della Pericolosità da frana PAI (Fig. 1) realizzata dall'ISPRA nell'ambito del Rapporto 2021 sul dissesto idrogeologico in Italia (Trigila *et al.*, 2021).

Dall'osservazione di tale cartografia emergono le seguenti osservazioni:

- tale cartografia dovrebbe essere chiamata: *collage* delle carte di pericolosità realizzate in Italia;
- anche in questo caso ci sarebbe da obiettare che il lavoro è incompleto, come minimo, costruito con criteri di classificazione non omogenei (la Val d'Aosta frana, il Piemonte molto meno; il Trentino frana, l'Alto Adige no; la Calabria frana come la Puglia...);
- è difficilissimo, se non impossibile, valutare la pericolosità da frana in quanto il termine pericolosità, oltre al concetto di magnitudo, contiene in sé anche quello di frequenza.

Molto probabilmente, il termine carta di Pericolosità deriva da obblighi imposti dalla normativa di settore europea e dai suoi recepimenti nazionali, ma il consiglio è quello di sostituire il (o almeno di affiancare al) termine pericolosità da frana quello di suscettibilità alle frane.

A questo punto ci sentiamo di proporre dei suggerimenti per realizzare cartografie di suscettibilità ai fenomeni franosi sia a livello nazionale sia a livello locale.

3.1. CARTOGRAFIA A LIVELLO NAZIONALE

Si parte dalla constatazione oggettiva che attualmente non esistono dati relativi ai parametri della suscettibilità su tutto il territorio nazionale. Per cui, anche se alcuni autori hanno proposto recentemente algoritmi e metodi statistici per estendere dati ricavati in aree campione sull'intero Paese, realizzando così cartografie nazionali per ogni tipologia di frana (Loche *et al.*, 2022), ci sentiamo di dire quanto segue:

- la scala di rappresentazione cartografica dell'intero paese renderebbe inutili molti sforzi sui dettagli che invece risultano necessari nelle cartografie a scala di pianificazione territoriale;
- per dare un'idea della suscettibilità alle frane del territorio nazionale è invece molto adeguato l'utilizzo di un parametro attendibile e disponibile per tutto il territorio nazionale in forma digitale, ad esempio l'acclività (Fig. 2) o l'energia del rilievo (Fig. 3).

L'analisi di acclività ed energia del rilievo rientrano nelle tecniche utili a descrivere quantitativamente la morfologia del terreno e parametrizzare i processi naturali (es., velocità del flusso d'acqua, intensità dell'erosione del suolo). Entrambi sono considerati fattori predisponenti i fenomeni franosi.

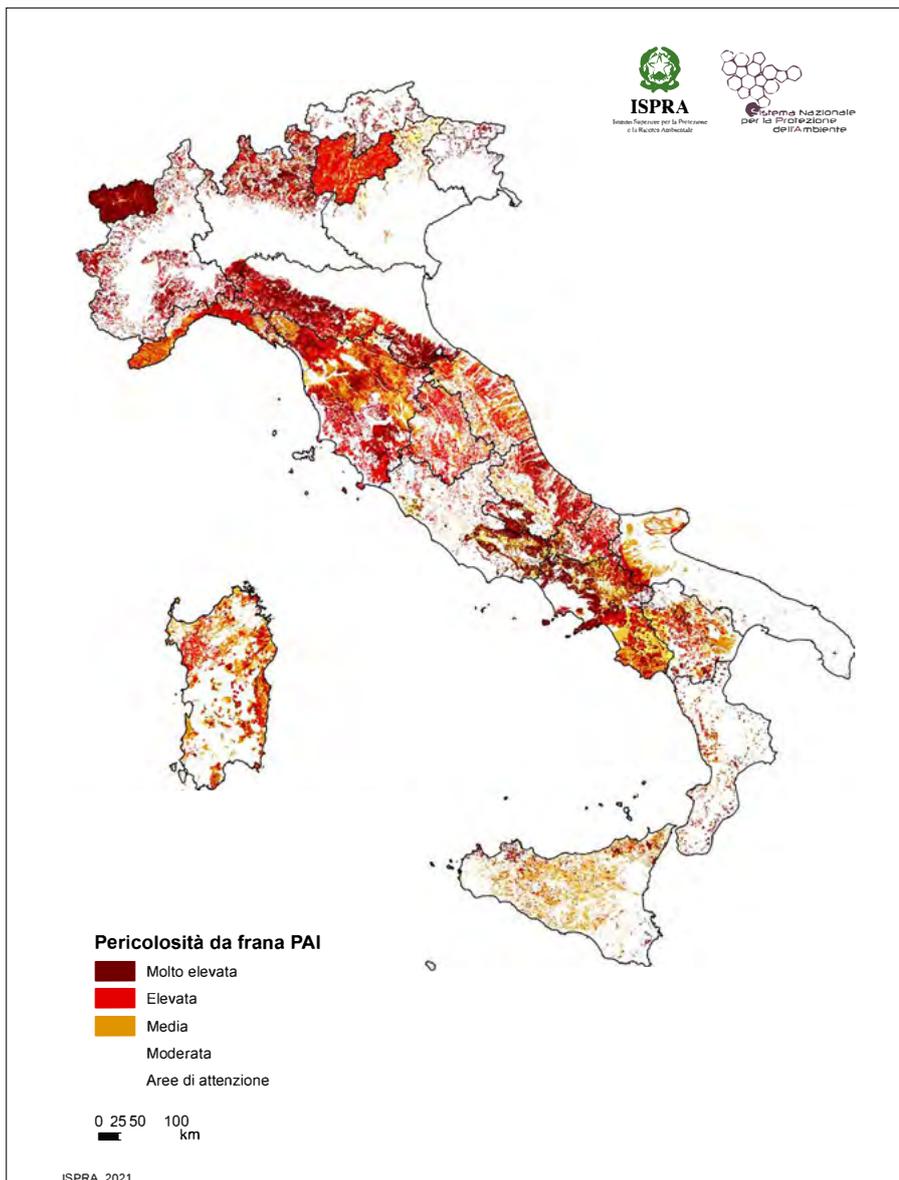


Figura 1. Carta della "Pericolosità da frana PAI" realizzata dall'ISPRA (Trigila *et al.*, 2021)

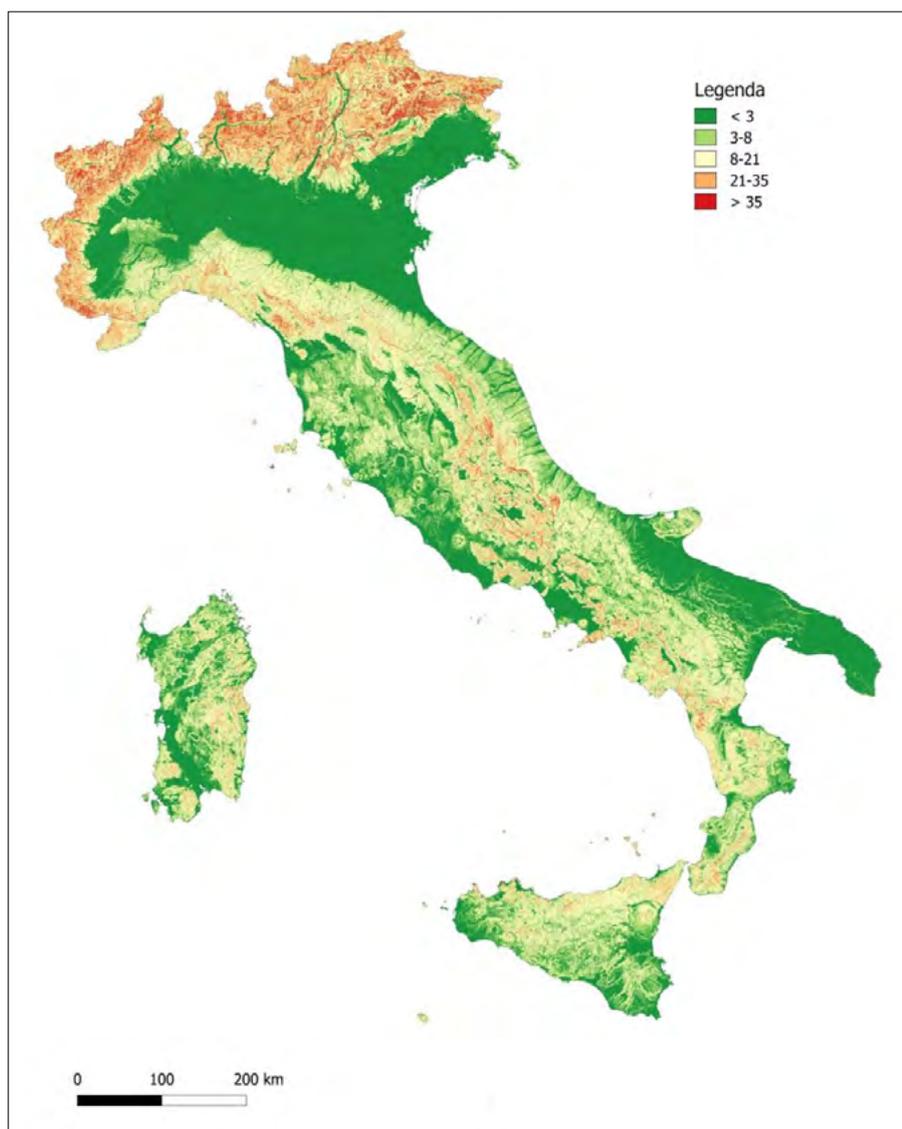


Figura 2. Carta della "Acclività del territorio nazionale" realizzata utilizzando un modello digitale del terreno con passo 20 m. Unità di misura in legenda (%)

tratto specifico che influisce sulle forze gravitazionali agenti sul terreno, l'energia del rilievo rappresenta l'ampiezza della variazione altimetrica, indicazione dell'energia potenziale accumulata in un'area geografica più estesa. In un'area la pendenza può variare notevolmente anche in presenza di un'energia del rilievo costante.

Per ottenere la carta dell'energia del rilievo di Fig. 3, è stato necessario suddividere tutta l'area del territorio nazionale in una griglia con maglie da 1km² (corrispondenti alle maglie del reticolato chilometrico IGM) per ciascuna delle quali è stato determinato il dislivello massimo, espresso in metri. Data la variabilità del paramento è stato ritenuto opportuno suddividere i valori di energia del rilievo in 10 classi. I valori dell'energia del rilievo sono stati calcolati utilizzando il comando *Zonal Statistic* in *Spatial Analyst*.

3.2. CARTOGRAFIA A LIVELLO

LOCALE

Aumentando la scala a livello comunale, è chiaro che si potranno e dovranno prendere in considerazione i parametri citati nel paragrafo 2. Ma anche in questo caso, si consiglia di applicare metodi omogenei su tutto il territorio nazionale e facilmente applicabili:

- suddividere la suscettibilità alle frane in base all'acclività e all'energia del rilievo;
- mettere in evidenza le diverse tipologie di frana che si possono verificare nelle zone segnalate come suscettibili;
- indicare come zone suscettibili di dissesto, oltre alle zone di innesco dei movimenti franosi, anche le vie di deflusso del materiale destabilizzato, cioè gli impluvi (questo discorso verrà ripreso nel paragrafo 6).

4. LA PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE

Secondo l'Istituto Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), un'alluvione è l'allagamento temporaneo di aree che abitualmente non sono coperte d'acqua. L'inondazione di tali aree può essere provocata da fiumi, torrenti, canali, laghi e, per le zone costiere, dal mare (Rif. WEB n. 1).

Una corretta valutazione della pericolosità da alluvione va condotta in ogni sezione dei corsi d'acqua valutando l'estensione laterale della portata di progetto (solitamente con tempo di ritorno di 200 o 500 anni). Questa valutazione deve essere effettuata senza considerare la presenza di argini o di altri tipi di difesa che va a mitigare il rischio delle abi-

L'**acclività** è il rapporto tra la differenza di quota (h) e la distanza planimetrica (d) tra due punti vicini. Si esprime in percentuale (h/d %) o in gradi ($\arctg h/d$). In un software GIS questa relazione viene quantificata tramite la derivata prima della superficie $z = f(x, y)$, calcolandola sull'elevazione di ogni cella del modello digitale del terreno (DTM) sottoposto al calcolo. Questo implica, per ogni cella, una derivazione in ciascuna delle direzioni verso le 8 celle limitrofe. Il software calcola il tasso massimo di variazione tra ogni cella e i suoi vicini (la variazione massima di quota in base alla distanza tra la cella e le otto vicine). La pendenza, quindi, è data dal rapporto tra massima differenza di quota e distanza tra i centri delle celle. Ogni cella ottenuta nel *raster* generato ha un proprio valore di pendenza (Moore *et al.*, 1991, Tarboton, 1997).

L'**energia del rilievo** è la differenza tra la quota massima e la quota minima, parametro indicativo dell'energia potenziale in un'area specifica. Può quindi

essere espressa utilizzando l'unità di misura dell'elevazione locale. In un software GIS, questo implica la creazione di un reticolo che viene sovrapposto al DTM.

Gli strumenti di statistica sui *raster* calcolano la differenza di elevazione tra le celle all'interno di ogni quadrato della maglia impostata. Il calcolo restituisce uno *shapefile* con il valore dell'energia del rilievo per ogni poligono coincidente con le celle del reticolo. Data la variabilità del parametro, in fase di categorizzazione del *layer* generato, è solitamente opportuno suddividere i valori in classi. L'energia di rilievo calcolata su aree di piccole dimensioni può consentire l'individuazione di zone caratterizzate da differente azione erosiva e approfondimento fluviale più o meno marcato. Questa diversa intensità di erosione può essere indicativa di sollevamenti o abbassamenti differenziali recenti o ancora in atto (O'Callaghan, 1984; Willgoose & Hancock, 1998; Simu, 2017).

In sintesi, la pendenza si riferisce alla ripidità o inclinazione in un punto o

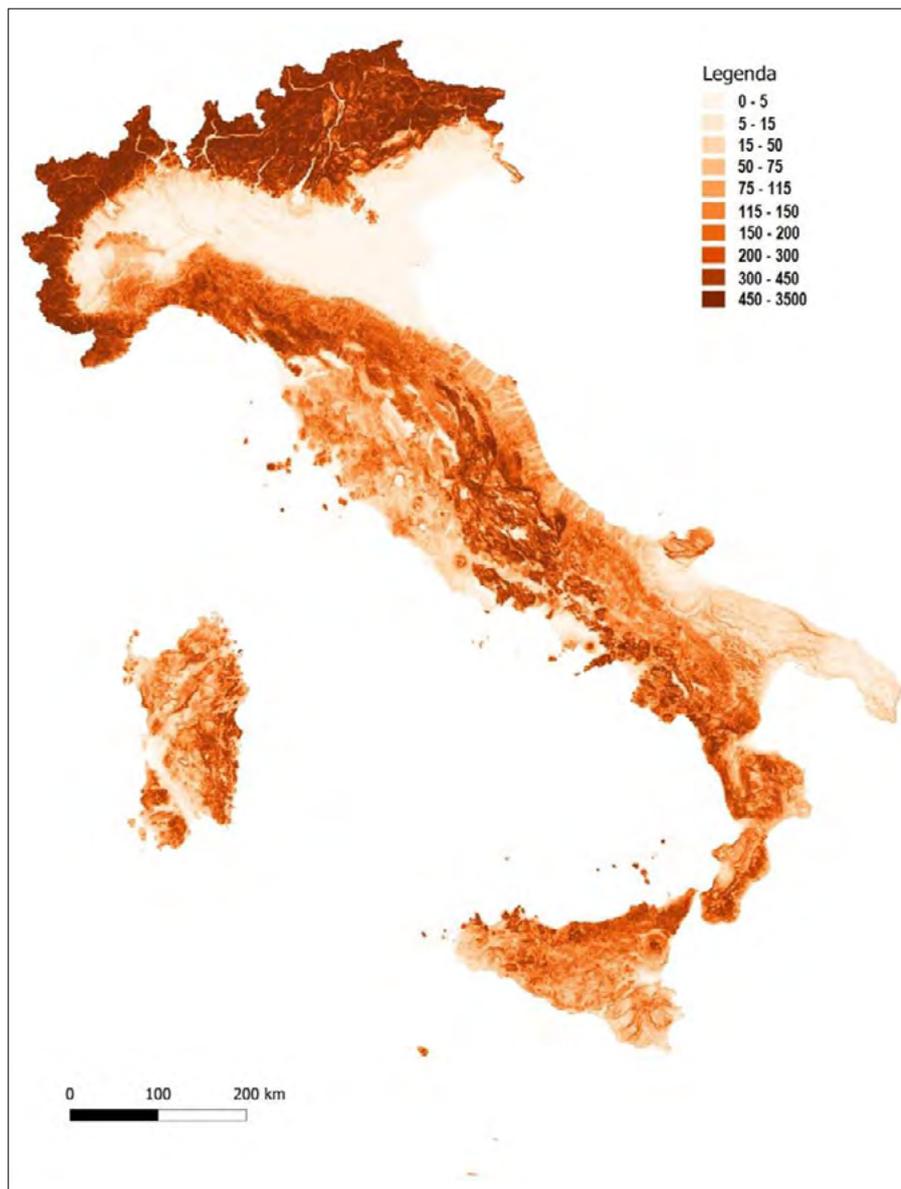


Figura 3. Carta della "Energia del rilievo del territorio nazionale" realizzata utilizzando un modello digitale del terreno con passo 20 m. Unità di misura in legenda (m)

tazioni esposte nella zona pericolosa abbassando la loro vulnerabilità, ma senza incidere minimamente sulla pericolosità.

5. PROPOSTE PER RAPPRESENTARE LA PERICOLOSITÀ DA ALLUVIONE

Anche per quanto riguarda la pericolosità da alluvione, l'ISPRA realizza la mosaicatura delle aree a pericolosità idraulica perimetrata dalle Autorità di Bacino Distrettuali (Trigila *et al.*, 2021). La mosaicatura viene effettuata secondo i tre scenari del D. Lgs. 49/2010 (Repubblica Italiana, 2010): pericolosità elevata con tempo di ritorno fra 20 e 50 anni (alluvioni frequenti), pericolosità media con tempo di ritorno fra 100 e 200 anni (alluvioni poco frequenti) e pericolosità bassa (scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi).

Così come per le frane, anche nel caso delle alluvioni sembra che l'inten-

to sia quello di rispondere comunque al recepimento della direttiva europea, senza curarsi dell'omogeneità dei dati a disposizione. Il risultato è ben visibile, ad esempio nella cartografia delle aree allagabili per scenario di pericolosità da alluvione media (Fig. 4):

- la Valle d'Aosta si allaga più del Piemonte;
- l'Alto Adige non si allaga rispetto alle aree limitrofe;
- il Molise si allaga rispetto alle regioni confinanti;
- la Calabria sembra destinata ad essere interamente sommersa;
- la pianura emiliano romagnola è giustamente indicata come pericolosa (a causa della sua generale soggiacenza ai corsi d'acqua che sostenuti a stento dagli argini la attraversano a quote più alte), ma appena oltre il confine, il Polesine, nelle stesse condizioni di pericolosità, non sembra aver problemi.

Anche per la pericolosità da alluvioni quindi vengono di seguito proposte alcune idee per la cartografia della pericolosità da alluvione sia a livello nazionale sia a livello locale.

5.1. CARTOGRAFIA A LIVELLO NAZIONALE

Poiché la scala molto piccola non permette la visione di dettagli, si consiglia di:

- indicare gli impluvi principali e secondari utilizzando le tecniche suggerite nel par 6 e spiegando nelle note illustrative della carta i criteri di valutazione di pericolosità idrologica da applicare a livello locale;
- indicare le coste basse, pericolose perché suscettibili di allagamenti per cause di diversa origine;
- indicare le aree caratterizzate da terre basse (*neder lands*), in cui la pianura si trova ormai a una quota inferiore al letto dei corsi d'acqua.

5.2. CARTOGRAFIA A LIVELLO LOCALE

A livello comunale, bisogna dare dei metodi semplici e omogenei da utilizzare su tutto il territorio nazionale o addirittura comunitario (a questo dovrebbe servire l'Unione Europea):

- utilizzare pioggia di progetto di 500 mm giorno (molti territori sono sprovvisti di serie storiche di piogge intense per poter calcolare le curve di probabilità pluviometrica con diversi tempi di ritorno);
- valutare le portate di massima piena nelle sezioni non solo dei corsi d'acqua, ma di tutti gli impluvi in cui convergono le linee di flusso, perpendicolari alle linee ad egual potenziale di quota (isopse). Qui si incanalano naturalmente flussi che per l'elevata energia cinetica possono essere devastanti per l'uomo e i suoi beni esposti imprudentemente su queste traiettorie. Il materiale che transita può essere tanto l'acqua di ruscellamento (alluvioni), quanto la neve (valanghe), quanto il terreno (colate di terra) o i detriti (colate di detrito) e, in altri contesti, i flussi di lava, i lahar, le nubi ardenti;
- valutare lateralmente fin dove si estende la portata di progetto (utilizzando l'intensità di 500 mm/giorno e un coefficiente di deflusso = 1);
- mappare le terre basse sopra descritte e, grazie alla scala maggiore, mettere in risalto le differenze di quota tra il piano campagna e la quota dei letti fluviali pensili.

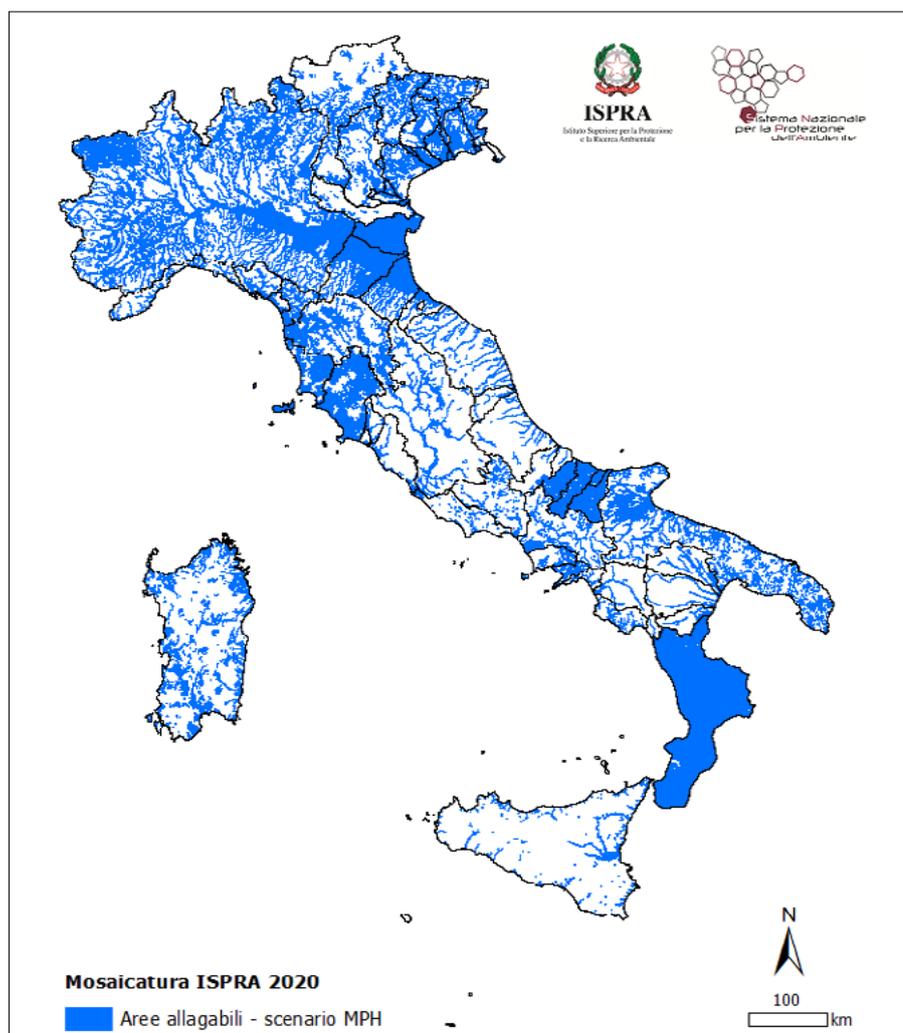


Figura 4. Aree allagabili per scenario di pericolosità da alluvione media (Medium Probability Hazard – MPH) – Mosaicatura ISPRA, 2020 (Trigila et al., 2021)

6. RAPPRESENTAZIONE DEGLI IMPLUVI

Per concludere, si danno alcuni suggerimenti per rappresentare gli impluvi quali zone tra le più suscettibili al dissesto geo-idrologico.

Per visualizzare, mappare e quantificare gli effetti puramente morfologici legati a processi di deflusso, esistono numerosi strumenti, disponibili direttamente tramite piattaforme come GRASS GIS (Rif. WEB n. 2) e per estensione disponibili all'uso nel software Quantum Gis. Tutti questi strumenti hanno in comune la pura e semplice dipendenza da un modello digitale del terreno (DTM), da un modello di elevazione (DEM) o di una superficie (DSM). In generale, si tratta di algoritmi che, sfruttando relazioni geometriche e trigonometriche, permettono una valutazione semplice e rapida, ma pur sempre quantitativa, della tendenza di una data morfologia a concentrare il deflusso liquido e a esprimerne l'ordine di grandezza o la quantità. Benché i modelli teorici da cui derivano questi strumenti facciano riferimento al deflusso idrico superficiale, nulla vieta che

questo dato possa esser valido anche per altri fluidi, quali, ad esempio, miscele di acqua e sedimenti.

Di seguito si presentano tre di questi indici: *Stream Power Index*, *Flow accumulation*, *Topographic Wetness Index*, utilizzati rispettivamente nelle Figure 5, 6 e 7 nel territorio comunale di Montecosaro, interessato dall'evento alluvionale del 25 ottobre 2011.

6.1 STREAM POWER INDEX

Lo *Stream Power Index* (o SPI) descrive l'entità del deflusso liquido per ogni punto del modello considerato. Questo indice di fatto esprime la tendenza delle forze esercitate dalla gravità a muovere acqua, o anche altri fluidi, verso valle. L'indice è calcolato come segue:

$$SPI = a \cdot \tan(\beta)$$

dove a corrisponde all'area cumulata a monte del punto considerato per unità lineare di curva di livello, mentre β è l'angolo della pendenza locale. Per valori di $a < 0$, l'indice stesso avrà valori negativi: questa condizione esprime il

caso in cui il deflusso verso un punto sia alimentato da territorio al di fuori dell'area in studio (Moore et al, 1991).

L'indice SPI è disponibile tra i risultati prodotti dall'algoritmo *r.watershed*.

6.2 FLOW ACCUMULATION

L'indice *Flow Accumulation* (o F) quantifica per ciascun punto del modello dell'area in studio il numero di linee di deflusso che lo attraversano: ciò corrisponde al numero di linee di flusso dell'intera area che abbiano almeno un vertice in corrispondenza della cella considerata. Le linee di deflusso sono simulate secondo il *raindrop method*, che replica appunto il movimento verso valle di una goccia di pioggia secondo quanto imposto dalla morfologia locale. Le linee di deflusso tenderanno pertanto a concentrarsi in impluvi e valli.

L'indice F descrive, dunque, aree di accumulo. Poiché per quantificare F, anche le linee di deflusso devono esser quantificate (in termini di lunghezza e posizione), con un rapido in studio: infatti, per come è definito l'indice F, moltiplicandolo per la risoluzione calcolo è possibile determinare l'area del bacino idrografico sotteso a ciascuna cella del modello digitale dell'area del modello (cioè, l'area coperta da una singola cella) si ricava l'area a monte che contribuisce al deflusso in un dato punto (Mitasova et al., 1995).

Questo indice è calcolato utilizzando l'algoritmo *r.flow*.

6.3 TOPOGRAPHIC WETNESS INDEX

Il *Topographic Wetness Index* (o TWI), anche denominato *Topographic Concentration Index* (o TCI), appare molto simile all'indice SPI. Concettualmente, infatti, esprime sempre la tendenza dell'acqua a concentrarsi in un dato punto, oltre alla propensione dell'attrazione gravitazionale a muovere fluidi verso valle. La definizione dell'indice è la seguente:

$$TWI = \ln(a / \tan(\beta))$$

dove, di nuovo, a rappresenta l'area cumulata a monte del punto considerato per unità lineare di curva di livello, mentre β è l'angolo della pendenza locale. In questo caso, l'indice ha valore negativo se $a / \tan(\beta) < 1$. (Quinn et al., 1991)

Questo indice è disponibile come TCI tra i risultati prodotti degli algoritmi *r.terraflow* e *r.watershed*, oppure, come TWI, come risultato degli appositi algoritmi *r.topidx*.

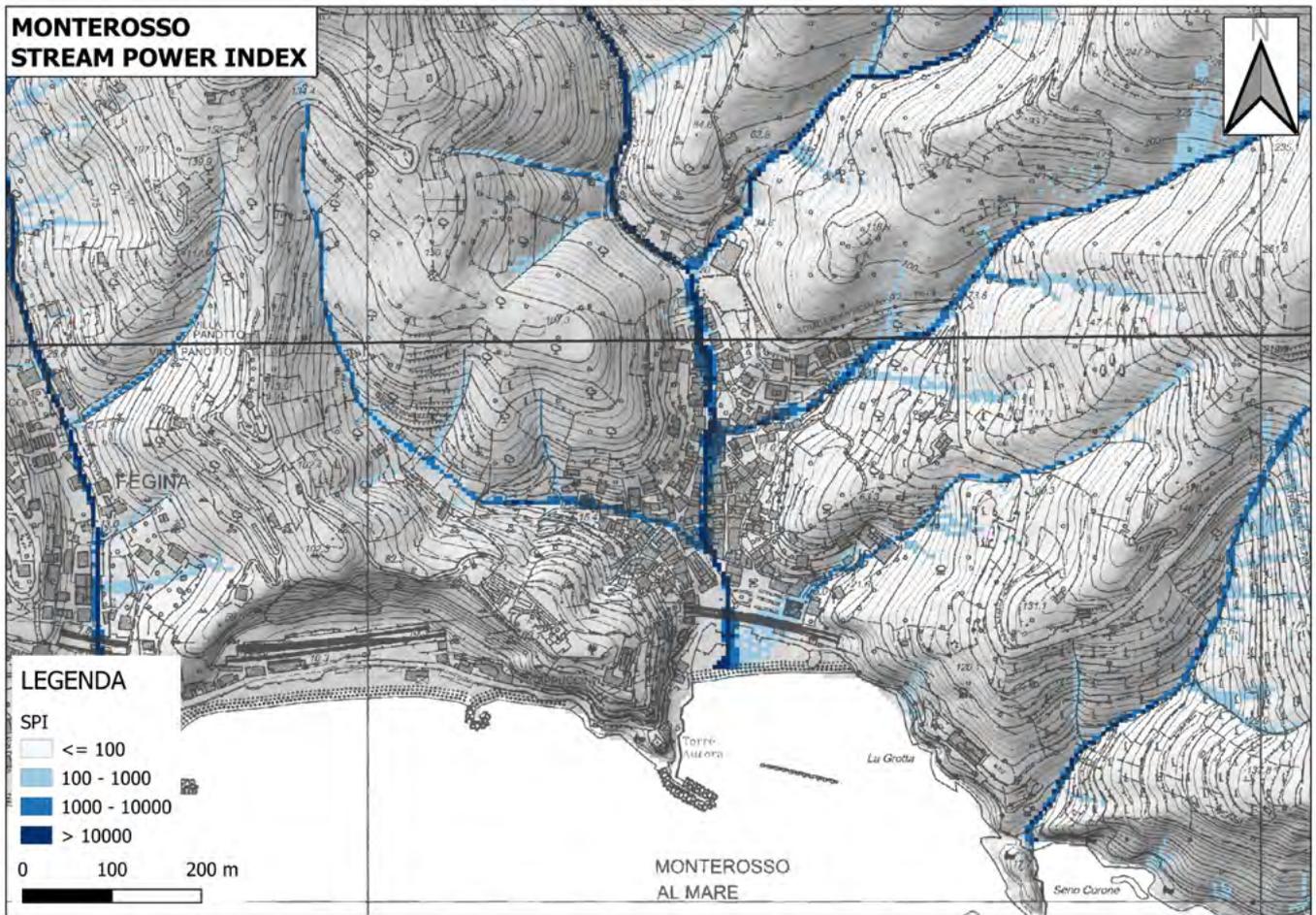


Figura 5. Rappresentazione degli impluvi nel territorio comunale di Monterosso utilizzando lo Stream Power Index

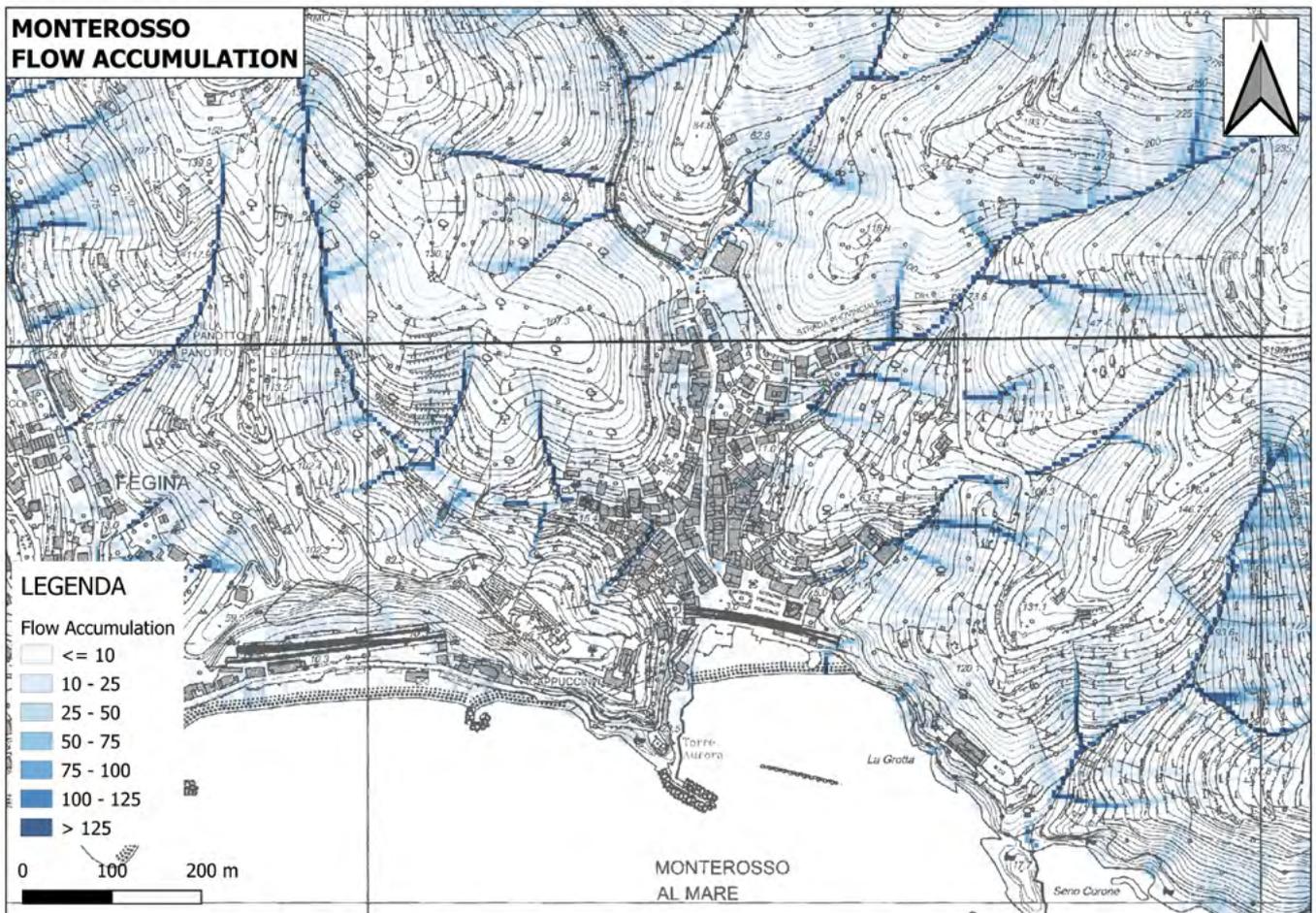


Figura 6. Rappresentazione degli impluvi nel territorio comunale di Monterosso utilizzando il Flow accumulation

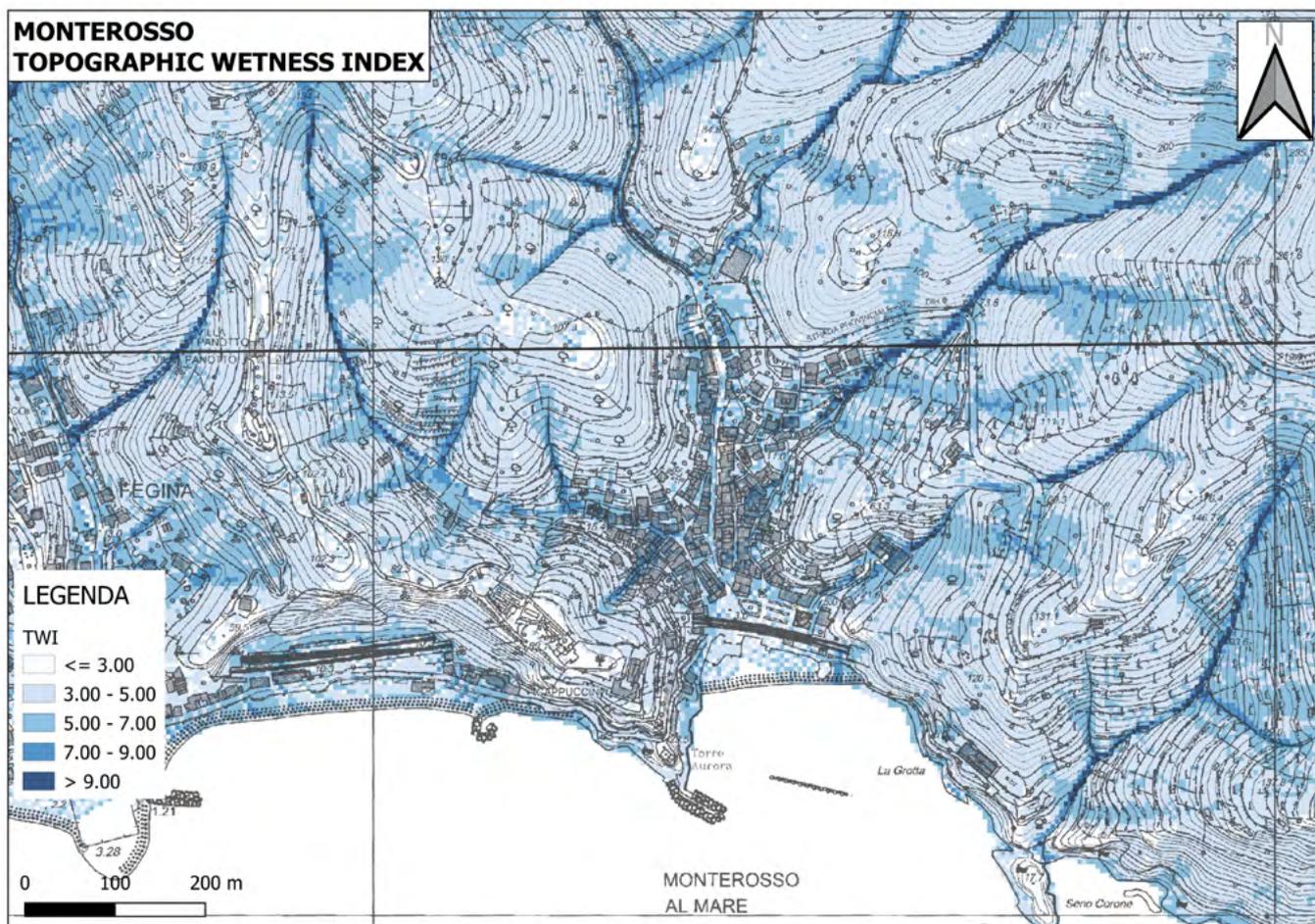


Figura 7. Rappresentazione degli impluvi nel territorio comunale di Monterosso utilizzando il Topographic Wetness Index

BIBLIOGRAFIA

- BENINI G. (1990), *Sistemazioni idraulico forestali*. Collana Scienze forestali e ambientali. UTET, Torino, 308 pp., ISBN-13: 978-8802043401.
- BOVE A., MASCIOCO L. (2020 a), *Pericolosità e rischio geomorfologico in Italia: concetti e criticità*. Periodico dell'Associazione Georisorse Ambiente - GEAM PANGEA - Quadrimestrale, N.3, marzo-giugno 2020, 27-37, ISSN 2704-7458.
- BOVE A., MASCIOCO L. (2020 b), *Proposte per la mitigazione del rischio di alluvione in Italia*. Geologia dell'Ambiente, Periodico trimestrale della SIGEA - Società Italiana di Geologia Ambientale, N. 4/2020, Anno XXVIII - ottobre-dicembre 2020, 21-25, ISSN 1591-5352
- DESIO A. (1985), *Geologia applicata all'ingegneria*. Hoepli editore, ristampa anastatica della terza edizione riveduta e aggiornata, 1232 pp.
- GISOTTI G., MASCIOCO L., VANNUCCI G. (2016), *Proposte per la revisione e il riordino della normativa in materia di difesa del suolo e di contrasto al dissesto idrogeologico*. Geologia dell'Ambiente. Periodico della SIGEA, Società Italiana di Geologia Ambientale, n. 1/2016, ISSN 1591-5352, 26-29.
- GUZZETTI F, CARRARA A, CARDINALI M, REICHENBACH P. (1999), *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy*. *Geomorphology*, 31, 181-216. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
- GUZZETTI F, REICHENBACH P, CARDINALI M, GALLI M. AND ARDIZZONE F. (2005), *Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale*. *Geomorphology*, 72, 272- 299. DOI:10.1016/j.geomorph.2005.06.002.
- LOCHE M., ALVIOLI M., MARCHESINI I., BAKKA H., LOMBARDO L. (2022), *Landslide susceptibility maps of Italy: Lesson learnt from dealing with multiple landslide types and the uneven spatial distribution of the national inventory*. *Earth-Science Reviews* 232 (2022) 104125.
- MITASOVA H., MITAS L., BROWN W.M., GERDES D.P., KOSINOVSKY I., BAKER, T. (1995), *Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools for GRASS GIS*. *International Journal of Geographical Information Systems*, Vol. 9(4), pp.: 433-446.
- MOORE I.D., GRAYSON R.B., LADSON A.R. (1991), *Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications*, *Hydrological Processes*, Vol 5(1), pp.: 3-30. DOI: 10.1002/hyp.3360050103
- O'CALLAGHAN, J.F., & MARK, D.M. (1984), *The extraction of drainage networks from digital elevation data*. *Computer vision, graphics, and image processing*, 28(3), 323-344.
- QUINN P., K. BEVEN K., CHEVALLI R P., PLANCHON O. (1991), *The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using Digital Elevation Models*, *Hydrological Processes*, Vol 5(1), pp.: 59-79. DOI: 10.1002/hyp.3360050106
- REPUBBLICA ITALIANA (2010), *Decreto legislativo 23/02/2010, n. 49: 'Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni'*. Pubblicato nella Gazzetta Ufficio 2 aprile 2010, n. 77.
- ROSSI M, GUZZETTI F, REICHENBACH P, MONDINI A, PERUCCACCI S. (2010), *Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts*. *Geomorphology*, 114, 129-142. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.06.020. R
- SIMU (2017), *Using GIS to determine the energy of relief. Pattern module method*. Pangea, 17, 32-35.
- TARBOTON, D. G. (1997), *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. *Water resources research*, 33(2), 309-319.
- TRIGILA A., IADANZA C., LASTORIA B., BUSSETTINI M., BARBANO A. (2021), *Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2021*. ISPRA, Rapporti 356/2021
- WILLGOOSE, G. R., & HANCOCK, G. R. (1998), *Topographic effects on subsurface flow using a digital elevation model*. *Water Resources Research*, 34(3), 505-516.

RIFERIMENTI WEB

- Rif. WEB n. 1 - <https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/ suolo-e-territorio/dissesto-idrogeologico/le-alluvioni>
- Rif. WEB n. 2 - <https://grass.osgeo.org/grass82/manuals/index.html>