

Analisi di suscettibilità al dissesto franoso per la sicurezza e la funzionalità di infrastrutture di trasporto di superficie

P. Salmona, K. Hoorfar, I. Ferrando, B. Federici, R. Bovolenta

Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica e Ambientale, Università di Genova, Italia

SOMMARIO: In caso di eventi franosi che coinvolgono infrastrutture di trasporto di superficie, oltre al danno sugli elementi colpiti direttamente, si verificano impatti negativi derivanti dall'interruzione di servizi fondamentali. D'altra parte, le stesse infrastrutture sono un'importante causa dello sviluppo di alcuni tipi di frane. In questo contesto la comprensione delle relazioni tra fenomeni di dissesto e infrastrutture di superficie diventa importante per un'efficiente gestione del rischio frana. Nell'ambito del Partenariato Esteso PNRR "RETURN" si sta sperimentando una metodologia statistica per la redazione di mappe di suscettibilità, come strumento per identificare sia le porzioni di territorio maggiormente predisposte al dissesto, sia le caratteristiche più influenti per lo sviluppo di tali fenomeni. Si sta considerando inoltre l'applicazione di tale metodologia, una volta consolidata, anche in ambiti di maggior dettaglio e soggetti a condizioni particolari, tra cui le aree di interazione terreno - struttura dei ponti.

1 INTRODUZIONE

In caso di eventi franosi che coinvolgono infrastrutture di trasporto di superficie, oltre al danno sugli elementi colpiti direttamente, si verificano impatti negativi derivanti dall'interruzione di servizi fondamentali. Il ripristino della funzionalità delle infrastrutture diventa prioritario, ma può presentare tempi anche molto lunghi e costi ingenti, sia diretti che indiretti. Ad esempio, nel novembre 2019, a causa di intense piogge, una frana si è abbattuta sulla carreggiata nord dell'autostrada A6 Torino-Savona, all'altezza di Altare (Savona), interrompendo completamente il traffico e provocando ingenti danni. Successivamente, nel giugno 2024, il comune di Cogne è rimasto isolato a causa di una colata detritica registrata in frazione Epinel, lungo la strada regionale che conduce alla località ai piedi del Gran Paradiso e in concomitanza anche le strade comunali di Valnontey erano vietate al transito a causa di una frana caduta a Teuf e Lillaz.

Conviene quindi identificare le aree potenzialmente soggette a fenomeni di dissesto ed intervenire in anticipo. A tal fine, l'analisi della suscettibilità al dissesto franoso è uno strumento utile alla gestione del rischio frana, alla pianificazione e anche nell'ambito di sistemi d'allerta (Meyer et al., 2014).

2 IL CONTESTO DI LAVORO

Nell'ambito del Partenariato Esteso PNRR "RETURN" (Fondazione RETURN, 2024), si sta sviluppando uno strumento per valutare su base statistica la suscettibilità al dissesto franoso a livello regionale o di bacino (ossia per areali superiori a 1000 km²) in modo da identificare le porzioni di territorio maggiormente predisposte al dissesto sulla base di fattori di primaria importanza nella genesi del fenomeno. Si propone quindi una metodologia basata su dati disponibili su scala nazionale, quindi, applicabile allo stesso modo a tutto il territorio italiano e in grado di fornire un prodotto più coerente.

Tale strumento verrà utilizzato all'interno del dimostratore realizzato nell'ambito di "RETURN" e potrà supportare gli enti territoriali nella gestione del rischio frana, nella valutazione di potenziali interazioni tra frana ed infrastruttura e nella pianificazione degli interventi.

2.1 *Calcolo della suscettibilità al dissesto franoso su base statistica*

L'impiego di metodologie statistiche è ampiamente sperimentato. Esse sono utilizzate a scala regionale e di bacino per identificare le aree in cui è maggiore la probabilità di eventi franosi

(Akbar et al., 2021). Si basano sul principio che le aree con caratteristiche (fattori predisponenti) simili a quelle in cui si è verificata una frana hanno maggiore probabilità di sviluppare fenomeni analoghi. Su questa base, il gruppo di lavoro sta attualmente sperimentando una metodologia per la realizzazione di mappe di suscettibilità ad alcuni tipi di frane in terra, che sia (1) trasferibile a territori diversi, (2) a basso costo, e (3) adatta ad uno screening veloce anche su aree vaste.

2.2 Applicazione della regressione logistica in ambiente GIS

Il modello impiegato è la regressione logistica (Xiaohui et al., 2018), applicata in ambiente GIS (Geographic Information System). Il software utilizzato in questa fase è il GIS free e open-source GRASS (GRASS GIS, 2024), che gestisce velocemente quantità notevoli di dati e permette di memorizzare sequenze di comandi sotto forma di script.

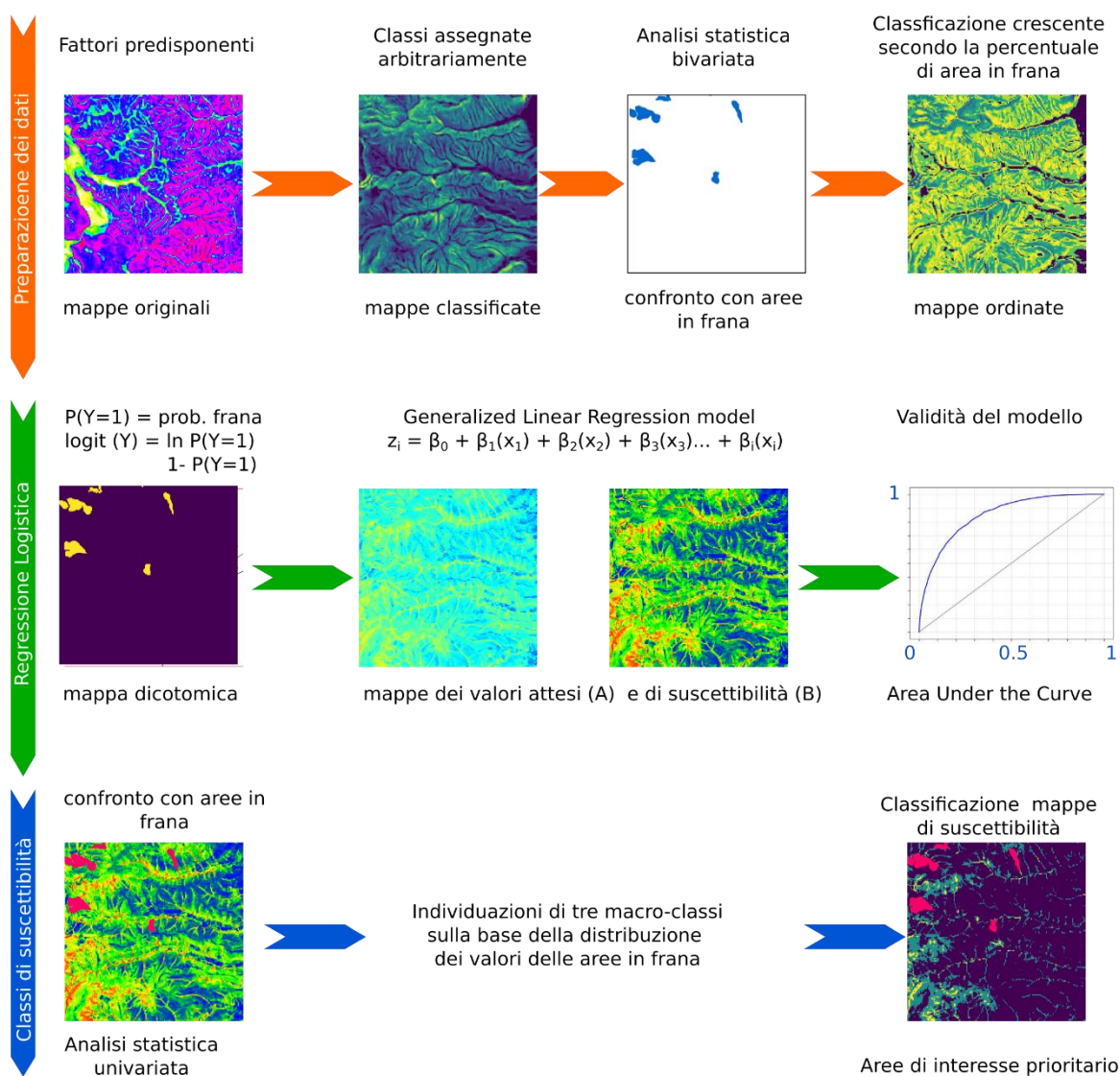


Figura 1. Processo di redazione di mappe di suscettibilità tramite regressione logistica.

Le mappe raster dei fattori predisponenti, accumulazione, aggressività climatica (Gregori, 2006; Consultazione dati meteorologici della Regione Liguria, 2024), distanza dalle reti di trasporto (Geoportale Regione Liguria, 2024), esposizione, litologia (Bucci et al., 2021), pendenza, quota, distanza dalle infrastrutture di trasporto (Geoportale Regione Liguria, 2024) e uso del

suolo, sono messe in relazione con la mappa della franosità reale riportata nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI – IdroGEO, 2024), in modo tale da ottenere per ogni pixel il valore della probabilità che si sviluppi una frana. Per rendere le mappe risultanti facilmente interpretabili, una classificazione della suscettibilità al dissesto in sole tre classi (alta, media e bassa) viene generalmente adottata e la scala cromatica semaforica contribuisce ulteriormente a rendere le mappe particolarmente chiare (Figura 1). Questa procedura si è già dimostrata valida, fornendo informazioni sulle aree potenzialmente a rischio frana più dettagliate e precise di quanto riportato nelle mappe ufficiali (Bovolenta et al., 2016). Nel corso del Progetto RETURN, la suddetta procedura è stata ripresa e integrata per ottimizzarne il workflow, migliorare l'affidabilità del modello e renderlo trasferibile e scalabile.

Un primo caso studio è stato svolto sulla provincia di Savona, con la prospettiva di replicare la procedura anche su altre aree italiane. A questo proposito si è scelto di utilizzare esclusivamente dati open e disponibili su scala nazionale o armonizzati a livello regionale/di bacino. Le aree in frana, riportate nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia, sono state suddivise per tipo di cinematisma in colamenti lenti, colamenti rapidi, scivolamenti rotazionali-traslativi, frane complesse, aree soggette a frane superficiali diffuse e frane non determinate.

3 LE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO DI SUPERFICIE

Nella procedura sopra descritta, le strade sono considerate un fattore predisponente allo sviluppo di frane per l'impatto che hanno sulla morfologia del territorio, ossia per le alterazioni che portano alla forma naturale del pendio. Contemporaneamente, tali infrastrutture sono un bene che è messo a rischio dalle frane stesse. Questa duplice relazione è stata quindi approfondita per capire la reciproca interazione tra dissesto franoso e infrastruttura stradale, consentendo una migliore mappatura della suscettibilità al dissesto franoso e una migliore valutazione della possibile interferenza di questo con la infrastruttura.

3.1 Frane e infrastrutture

Un iniziale confronto è stato effettuato considerando i tipi di frane che interessano la rete di trasporto di superficie e le aree ad essa adiacenti. Sono state considerate le strade carrabili (autostrade, strade di scorrimento extraurbane e urbane, strade secondarie e di servizio extraurbane e urbane), le ferrovie e i relativi spazi accessori. Ponti, viadotti, gallerie e la viabilità secondaria (strade sterrate, mulattiere, sentieri, strade non carrabili in generale) sono stati invece esclusi. Sono state quindi individuate diverse fasce di distanza dall'asse stradale, rispettivamente a 50, 100, 150, 200, oltre 200 m, considerando questa misura il limite oltre cui l'influenza della strada si può considerare irrilevante (Brenning et al., 2015). Tutte le aree a distanza superiore a 200 m sono state raccolte in un'unica categoria.

Da questo confronto risulta che solo una parte ridotta delle frane censite ricade nelle fasce individuate entro 200 m e, come si vede dal grafico (Figura 2), la distanza è rilevante solo nel caso delle "aree soggette a frane superficiali diffuse", definite nell'IFFI come "tutti quei settori di versante che in passato sono stati interessati da frane di varia tipologia che coinvolgono spessori generalmente limitati dei terreni sciolti di copertura e che si sono innescate contestualmente ad eventi idro-meteorologici di forte intensità" (APAT, 2007).

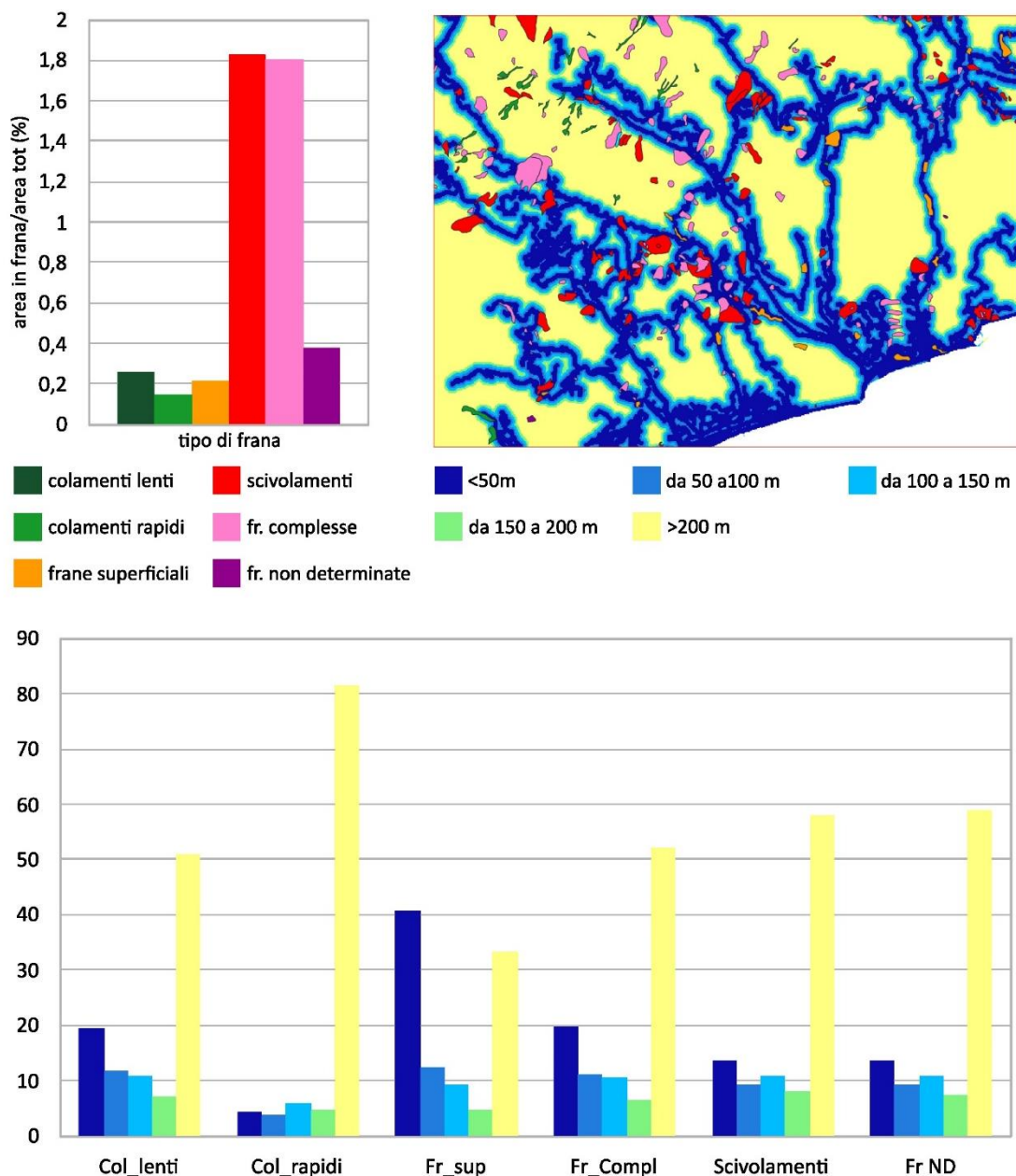


Figura 2. Distribuzione dei diversi tipi di frane in prossimità delle infrastrutture di superficie.

3.2 Influenza della rete di trasporto di superficie sullo sviluppo di fenomeni franosi

Considerando le classi di suscettibilità per le aree soggette a frane superficiali diffuse, una percentuale superiore all'85% delle infrastrutture di superficie o delle fasce di prossimità risulta in un'area con suscettibilità alta o intermedia (Figura 3). Questa percentuale scende notevolmente se si considerano gli altri tipi di frane.

Una successiva prova per capire la relazione tra infrastrutture di trasporto e suscettibilità al dissesto è consistita nel calcolare il modello includendo tutti i fattori previsti e successivamente escludendo la distanza dalla rete di trasporto. Questa verifica è stata effettuata sulle mappe di suscettibilità generali (non divise nelle tre macro-classi), considerando come campione statistico tutto il set di frane. Anche in questo caso appare che la vicinanza alle strade sia rilevante solo nel caso di "Aree soggette a frane superficiali diffuse". Per gli altri tipi di frana, invece, il miglioramento apportato al modello considerando questo fattore è molto basso o addirittura si ha un peggioramento.

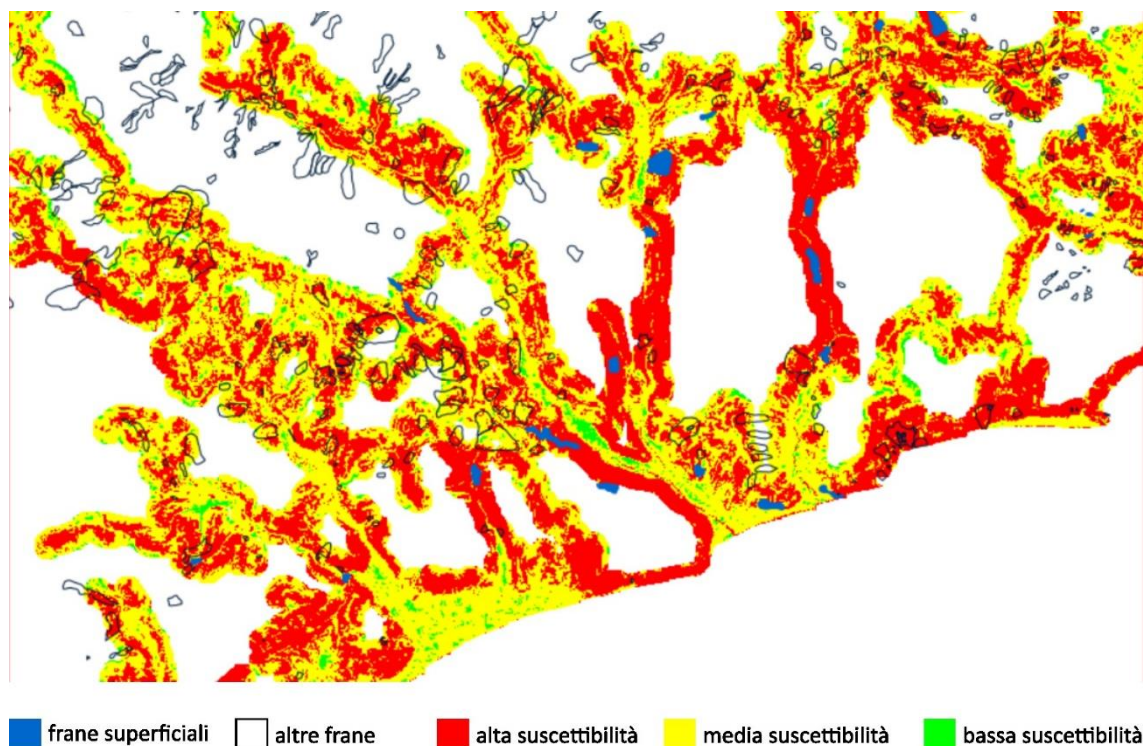


Figura 3. Suscettibilità alle frane superficiali diffuse in prossimità delle infrastrutture di superficie.

3.3 Possibile affinamento del modello

Una valutazione più accurata potrebbe essere effettuata integrando le fasce di buffer attorno alle strade con la morfologia del territorio. Ad esempio, nel caso di viabilità in prossimità del fondovalle, un buffer basato solamente sulla distanza potrebbe includere anche frane sul versante opposto a quello in cui si trova effettivamente la strada. Inoltre, alcune tratte di viabilità secondaria, tra cui strade storiche ora in disuso, e di accessibilità forestale o di cantiere comportano effettivamente una notevole alterazione dei pendii.

A livello di campione statistico utilizzato, la perimetrazione delle frane fornita dall'IFFI mette insieme le aree di ablazione e di deposito, quindi, soprattutto per territori non molto estesi, costituiscono un campione statistico poco affidabile. La validità del modello potrebbe aumentare identificando le parti di ablazione e inserendo unicamente quest'ultime.

Infine, bisogna considerare il fatto che lungo le strade, a seguito di forti piogge, si possono osservare anche altri segni di dissesto, generalmente di dimensioni ridotte, spesso in aree remote o poco trafficate. Questi, in alcuni casi, vengono trascurati per lungo tempo, altre volte sono stabilizzati con interventi locali e, anche se possono dare origine a fenomeni più estesi e rilevanti, non sono sempre inclusi nella cartografia ufficiale.

4 INTEGRAZIONE DEL MODELLO

Questo modello è stato realizzato utilizzando un set di fattori che tiene in considerazione gli aspetti principali e comuni alla maggior parte delle aree collinari e montane. Può comunque essere integrato prendendo in considerazione altri elementi presenti sul territorio, sia generali sia specifici di un'area. Partendo dal caso della frana di Savona del 2019, scatenata in seguito a forti piogge (Casagli et al., 2020), gli autori della presente memoria stanno conducendo uno studio, di seguito brevemente descritto, per determinare se e come l'erosione dovuta alle precipitazioni possa essere un precursore delle frane.

4.1 Il modello RUSLE

Il primo passo è consistito nel calcolare il tasso di erosione per la provincia di Savona utilizzando il modello RUSLE (Borrelli et al., 2021), che tiene in considerazione l'erosività delle precipitazioni (fattore R), l'erodibilità del suolo (fattore K), il fattore di lunghezza e pendenza del pendio (fattore LS), la gestione della copertura (fattore C) e la pratica di supporto (fattore P) (Märker et al., 2011) secondo la relazione:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P$$

Tenendo come riferimento la frana del 2019, per valutare la situazione presente prima che si verificasse, la modellazione dell'erosione è stata eseguita utilizzando set di dati disponibili del 2017. Questi set di dati sono stati estratti dal sito web dell'European Soil Data Centre (ESDAC), con risoluzione variabile, e sono stati ricampionati con risoluzione pari a 20 m.

I primi risultati emersi dal modello indicano che nell'area di studio sono presenti alcune aree caratterizzate da valori di A molto elevati (oltre $280 \cdot 10^3 \text{ Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{yr}^{-1}$). Considerando le aree con $A \geq 11$ come a rischio di erosione, si evidenziano quindi diverse situazioni in cui tale rischio è particolarmente elevato. Da un primo confronto con l'IFFI, emergono tre possibili contesti: (1) presenza di erosione seguita da fenomeni franosi, (2) presenza di erosione non seguita da fenomeni franosi, (3) presenza di fenomeni franosi in assenza o con un basso tasso di erosione.

Tali risultati vanno comunque confermati con un confronto con modelli messi a punto per periodi di pioggia intensi o fenomeni di particolare entità. Inoltre, siccome l'erosione è un fenomeno progressivo e variabile di intensità nel tempo, l'effettiva inclusione nel modello statistico è subordinata al reperimento di dati armonizzati dal punto di vista spaziale e temporale, con quelli relativi agli altri fattori predisponenti considerati.

5 APPLICAZIONI AI PONTI

5.1 Il quadro di riferimento

Le "Linee Guida per la Classificazione e la Gestione del Rischio, la Valutazione della Sicurezza ed il Monitoraggio dei Ponti Esistenti" (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2020), tramite l'identificazione di Classi di Attenzione, permettono di stimare in maniera speditiva diversi tipi di rischio, tra cui quello legato alle frane. Tale procedura fa riferimento sia alla singola infrastruttura, sia al contesto in cui è inserita. I dati necessari per effettuare la valutazione si ricavano da un censimento dei manufatti con approfondimento sugli aspetti costruttivi e di conservazione, unito ad un'analisi del territorio in cui ciascuno di essi si trova e delle caratteristiche della rete di cui fa parte.

In particolare, il fattore pericolosità relativo al contesto tiene conto dei fenomeni pregressi o in corso, in termini di stato di attività, velocità potenziale, magnitudo potenziale, ma anche della probabilità che altri si verifichino, ed è assimilato alla suscettibilità. A questo proposito, le Linee Guida raccomandano di fare riferimento alle carte di rischio redatte dagli organi ufficialmente preposti. La possibilità di ottenere mappe di suscettibilità aggiornate e a basso costo, che integrino quelle ufficiali, potrebbe quindi contribuire a migliorare l'identificazione dei manufatti maggiormente a rischio.

5.2 Il progetto Mind the Bridge

La metodologia statistica sarà inoltre applicata ad una scala di maggior dettaglio nell'ambito del progetto POR FESR Mind The Bridge, recentemente avviato con l'obiettivo di sviluppare la replica digitale (Digital Twin, DT) di un ponte oggetto di monitoraggio e dell'ambiente circostante, che sarà ingegnerizzato per integrare dati statici, dinamici e previsionali provenienti da una rete di numerosi sensori installati nell'ambito del progetto. In questo contesto, verranno effettuate valutazioni preliminari relative alla potenziale interazione ponte-frana, per la progettazione della rete di monitoraggio dei versanti.

6 CONCLUSIONI

Il modello proposto risulta utile per esplicitare la relazione tra aree soggette a frane superficiali diffuse e infrastrutture di trasporto. In particolare, l'utilizzo di dati e software open e disponibili su scala nazionale lo rende economico e trasferibile. Inoltre, la possibilità di registrare sequenze di comandi come script permette di utilizzarlo con facilità.

La definizione su base statistica di classi di suscettività al dissesto riesce a fornire una preliminare indicazione sulle porzioni di rete di trasporto con maggiore probabilità di essere interessate da eventi franosi superficiali diffusi, realizzando una base per le azioni di monitoraggio sul posto. In maniera complementare, può fornire informazioni sulla probabilità di occorrenza di eventi simili legati alla presenza dell'infrastruttura.

Anche se i fattori relativi alla geologia e alla morfologia del territorio, sono costanti nel tempo, uso/copertura del suolo, infrastrutture di trasporto, aspetti climatici, così come la localizzazione e l'estensione dei fenomeni franosi, sono in continua evoluzione. È quindi possibile osservare come varia la suscettibilità in conseguenza di cambiamenti dell'ambiente. Altri fattori predisponenti possono essere inclusi nella procedura, ma come prima condizione è necessario che i dati che li descrivono corrispondano agli standard stabiliti per il modello (disponibili per tutta l'area di studio, risoluzione e aggiornamento comparabili con quelli delle altre mappe considerate, etc.). Successivamente, è importante verificare come tali fattori influenzino la suscettibilità e considerarli solo nei casi in cui apportino un miglioramento al modello.

Al momento il modello è in fase di calibrazione con l'obiettivo di valutarne l'affidabilità per i diversi tipi di frane e di individuare relazioni ed elementi rilevanti per migliorare il risultato. I passi successivi saranno la validazione della metodologia e l'estensione ad altre aree. È inoltre previsto un confronto con le mappe di pericolosità di riferimento dell'Autorità di bacino distrettuale.

RINGRAZIAMENTI

Lo studio è condotto nell'ambito del Partenariato Esteso RETURN, finanziato dall'Unione Europea – Next-GenerationEU (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza – PNRR, Missione 4 Componente 2, Investimento 1.3 - D.D. 1243 2/8/2022, PE0000005)

BIBLIOGRAFIA

- Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici (APAT), 2007. Rapporto sulle frane in Italia. Il progetto IFFI- Metodologia, risultati e rapporti regionali. Rapp. 78/2007 ISBN: 978-88-448-0310-0
- Akbar A., Chen G., Yosufzai A., 2021. Comparison of GIS based Statistical Methods for Landslide Susceptibility mapping (Case Study Faizabad City, Afghanistan). *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 12(11), November-2021 1191, ISSN 2229-5518
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., 2021. Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the Total Environment*, 780, 146494
- Bovolenta R., Federici B., Marzocchi R. & Berardi R., 2016. A new GIS-based multivariate statistical analysis for landslide susceptibility zoning. In Aversa et al. (eds.) *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*, 511–516, ISBN 978-1-138-02988-0
- Brenning, A., Schwinn, M., Ruiz-Páez, A. P., Muenchow, J., 2015. Landslide susceptibility near highways is increased by 1 order of magnitude in the Andes of southern Ecuador, Loja province. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 15, 45–57, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-45-2015>
- Bucci F., Santangelo M., Fongo L., Alvioli M., Cardinali M., Melelli L. Marchesini, I., 2021. A new digital lithological Map of Italy at 1:100.000 scale [dataset]. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.935673> ultimo accesso 19/11/2024
- Casagli, N., Tofani, V., Sassa, K., Bobrowsky, P. T., Takara, K., 2020. Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk. *Monitoring and Early Warning*, 3. Springer Nature.
- Gregori E., M. Costanza Andrenelli M. C., Zorn G., 2006. Assessment and classification of climatic aggressiveness with regard to slope instability phenomena connected to hydrological and morphological processes. *Journal of Hydrology*, 329, 489– 499

- Märker, M., Pelacani, S., Schröder, B., 2011. A functional entity approach to predict soil erosion processes in a small Plio-Pleistocene Mediterranean catchment in Northern Chianti, Italy. *Geomorphology*, 125(4), 530–540
- Meyer N.K., Schwanghart W., Korup O., Romstad B., Etzelmüller, B., 2014 Estimating the topographic predictability of debris flows. *Geomorphology*, 207, 114–125
- Min. delle Infrastrutture e dei Trasporti – Cons. Sup. dei Lavori Pubblici 2020. Linee Guida per la Classificazione e la Gestione del Rischio, la Valutazione della Sicurezza ed il Monitoraggio dei Ponti Esistenti
- Xiaohui S., Jianping C, Yiding B., Xudong H., Jiewei Z., Wei P., 2018. Landslide Susceptibility Mapping Using Logistic Regression Analysis along the Jinsha River and Its Tributaries Close to Derong and Deqin County, Southwestern China. *International Journal of Geo-Information*, 7, 438, <https://doi.org/10.3390/ijgi7110438>
- Bucci F., Santangelo M., Fongo L., Alvioli M., Cardinali M., Meelli L. Marchesini, I., 2021. A new digital lithological Map of Italy at 1:100.000 scale [dataset]. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.935673> last visit 19/11/2024
- Consultazione dati meteorologici della Regione Liguria page <https://ambientepub.regione.liguria.it/Sira-QualMeteo/script/PubAccessoDatiMeteo.asp> last visit 25/09/2024
- Fondazione RETURN Partenariato Esteso Multi-Risk sciEnce for resilienT commUnities under a changiNg climate, <https://www.fondazionereturn.it/spoke2/> last visit 10/01/2025
- Geoportale Reg. Liguria <https://geoportal.regione.liguria.it/catalogo/mappe.html> last visit 25/09/2024
- GRASS GIS homepage, <https://grass.osgeo.org/> ultimo accesso 25/09/2024
- IdroGEO – La piattaforma italiana sul dissesto idrogeologico, <https://beta.idrogeo.isprambiente.it/app/> last visit 25/09/2024

ABSTRACT

GROUND INSTABILITY SUSCEPTIBILITY ANALYSIS FOR THE SAFETY AND FUNCTIONALITY OF THE SURFACE TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Keywords: extended partnership, landslide susceptibility, GIS, surface transport infrastructures, open data

In the case of landslides involving surface transport infrastructure, in addition to the damage to the elements directly affected, other negative impacts result from the disruption of essential services. On the other hand, the same infrastructure can be a relevant predisposing factor for the development of some types of landslides. In this context, understanding the relationships between landslide phenomena and surface infrastructure becomes an asset for efficient landslide risk management. As part of the work carried out by the University of Genova research group within the RETURN Extended Partnership, a statistical methodology for processing hazard maps is presently being finalized, as a tool for identifying in an inexpensive, portable and customizable workflow, both the areas of land most susceptible to landslides and the features most influential in the development of such phenomena. This methodology, once consolidated, will also be applied to integrate the current risk maps for specific areas, i.e., where bridges are located, in accordance with the guidelines for classification and risk management, safety assessment and monitoring of existing bridges.