

ORDINE DEGLI INGEGNERI  
DELLA  
PROVINCIA DI SALERNO



**C.U.G.R.I.**  
Consorzio inter-Universitario  
per la Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi  
Università di Salerno - Università di Napoli "Federico II"



*Ciclo di seminari*

## MODELLI DI GESTIONE DELLE INFRASTRUTTURE VIARIE IN AREE AD ELEVATO RISCHIO IDROGEOLOGICO

**21 giugno 2023**

Sede Ordine degli Ingegneri della Provincia di Salerno

**Autori:**

*Settimio Ferlisi, Antonio Marchese, Gianfranco Nicodemo, Dario Peduto*

**Titolo:**

*Il modello di analisi del rischio da frana orientato alle  
infrastrutture di mobilità*

# Introduzione

- Le reti stradali rivestono un ruolo decisivo nello sviluppo economico di una società (Castelli, 2017)



- A causa della loro tipica estensione lineare, sono esposte al rischio generato da numerosi pericoli



**Alluvioni**



**Terremoti**



**Frane**

Le reti stradali possono essere affette da diverse tipologie di frana



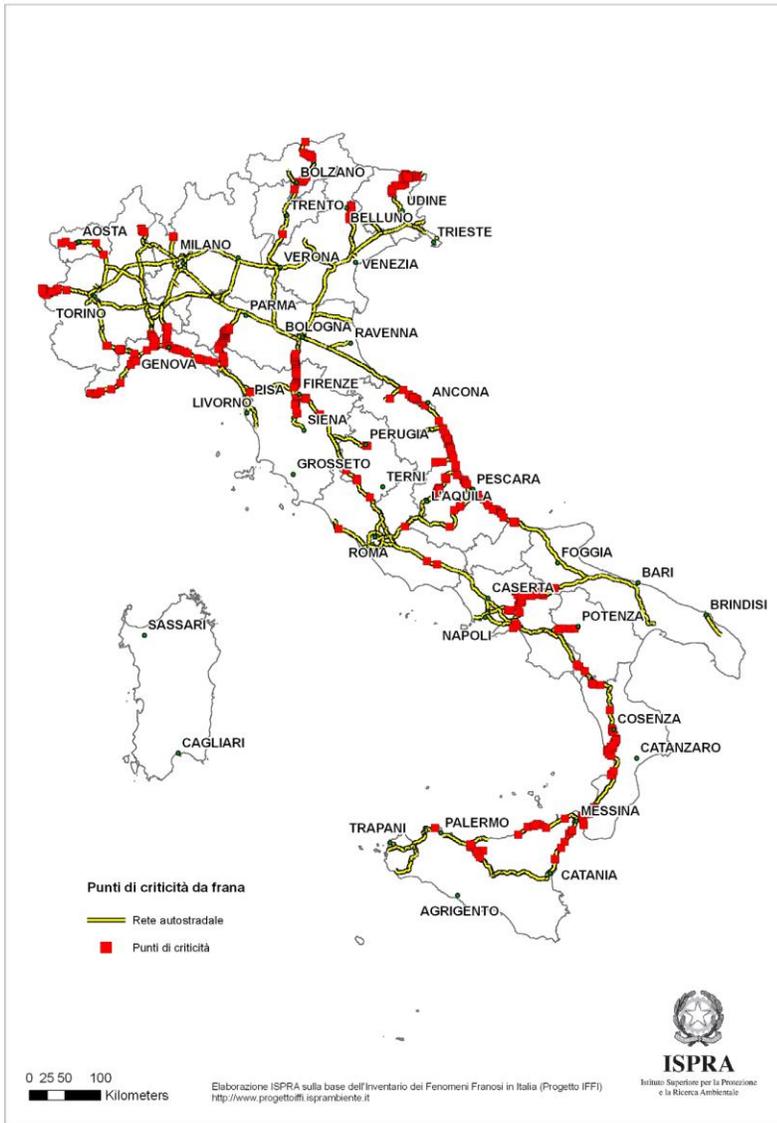
Classe	Descrizione	Velocità tipica	Velocità (m/s)
7	Estremamente rapido	5 m/sec	5
6	Molto rapido	3 m/min	$5 \cdot 10^{-2}$
5	Rapido	1,8 m/ora	$5 \cdot 10^{-4}$
4	Moderato	13 m/mese	$5 \cdot 10^{-6}$
3	Lento	1,6 m/anno	$5 \cdot 10^{-8}$
2	Molto lento	16 mm/anno	$5 \cdot 10^{-10}$
1	Estremamente lento	< 16 mm/anno	< $5 \cdot 10^{-10}$

(Cruden e Varnes, 1996)

Le frane generano **rischi** per le persone transittanti, per le stesse strade e per le attività economiche

- *Danni diretti* (ad esempio, alla pavimentazione stradale con gli associati costi di riparazione)
- *Danni indiretti* (ad esempio, la riduzione delle attività economiche dovute alle restrizioni di accesso in un'area)

# Introduzione



l'ISPRA ha individuato 6.180 punti di criticità per frane lungo la rete stradale principale (autostrade, superstrade, strade statali, tangenziali e raccordi), di cui 720 lungo la rete autostradale. In tali punti i tracciati stradale e ferroviario potrebbero essere interessati dalla riattivazione di frane già censite e cartografate nell'Inventario IFFI.

Punti di criticità lungo la rete autostradale (Annuario dei Dati Ambientali, ISPRA 2014)



# Analisi del rischio da frana

L'analisi del rischio può essere:

## Qualitativa (prioritizzazione)

Le analisi qualitative del rischio descrivono l'entità delle conseguenze e la probabilità che queste ultime si verifichino mediante scale nominali, descrittive o numeriche (Fell et al. 2008)

**Punteggi**

→ **frane di primo distacco in rocce o terreni** (Bunce et al. 1997, Budetta 2004, Li et al. 2009, Ferlisi et al. 2012, Budetta and Nappi 2013, Vishal et al. 2017, Wong 1998, Lowell and Morin 2000, ODOT 2001, Liang et al. 2006)

**Matrici**

→ **differenti tipologie di frana** (Pellicani et al., 2017)

## Quantitativa (perdita della vita)

Le analisi quantitative del rischio (QRA) si basano su stime numeriche della probabilità di accadimento (della generica tipologia di frana) e delle associate conseguenze (riferite a uno o più elementi esposti) (Fell et al., 2008).

**Rischio per l'individuo**

→ **frane di primo distacco in rocce o terreni**

Rischio per persone su veicoli fermi/in movimento

**Curve F-N**

**Frane a cinematica lenta**



Numericamente limitati sono i contributi specificamente orientati alla stima quantitativa del rischio per frane affette da frane esistenti (Argyroudis et al., 2019).

# Obiettivi ed elementi di novità del lavoro

*Gli **obiettivi** da perseguire a grande scala (1:5.000) riguardano:*

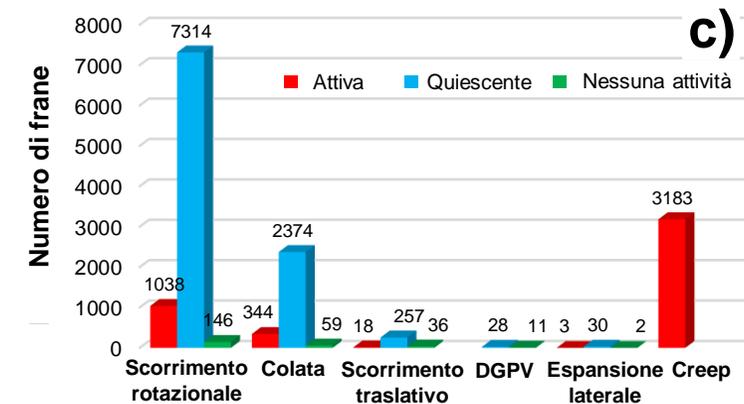
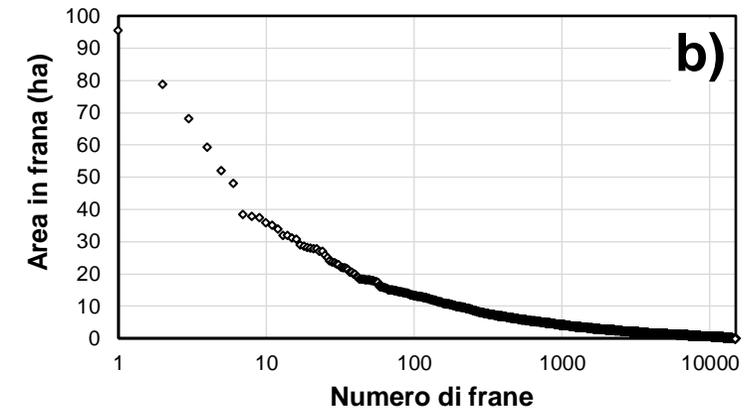
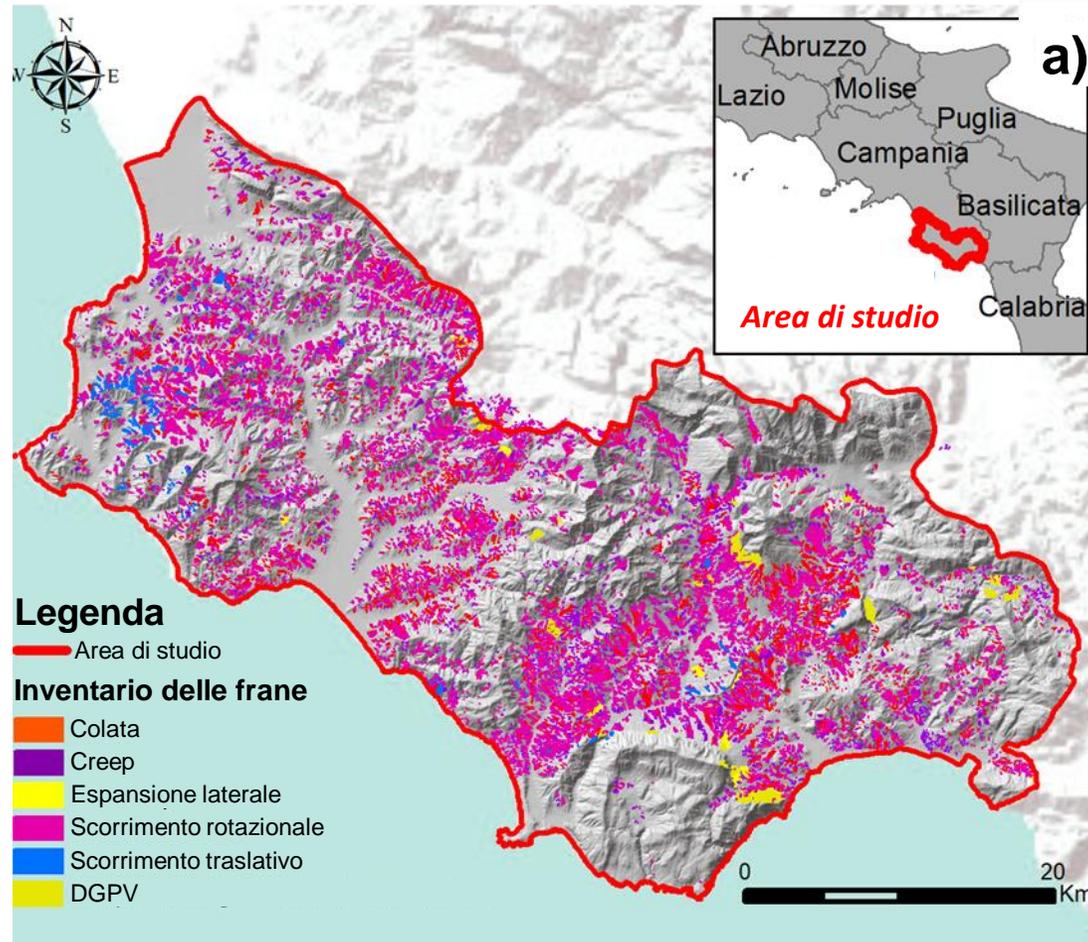
- *la **stima quantitativa del rischio** per danni diretti a una rete stradale esposta al rischio da frane a cinematica lenta assunta non danneggiata*
- *la **stima quantitativa delle conseguenze** per danni diretti a una rete stradale esposta al rischio da frane a cinematica lenta assunta danneggiata*
- *la **previsione del danno diretto e indiretto** mediante indicatori prestazionali stimati su base probabilistica con il metodo Monte Carlo con riferimento a una rete stradale assunta non danneggiata*

*I principali **elementi di novità** sono:*

- *La stima della probabilità di accadimento di frane a cinematica lenta di assegnata intensità mediante dati DInSAR (**pericolosità**)*
- *Generazione di curve empiriche di fragilità e di vulnerabilità (queste ultime dipendenti dal tempo) per sezioni stradali affette da frane a cinematica lenta sulla base dell'uso congiunto di dati DInSAR e di danno (**vulnerabilità**)*
- *Uso delle curve di fragilità generate per analizzare le **prestazioni** di una rete stradale per la quale non si dispone di dati di danno e i dati DInSAR sono limitati*



# Caso di studio e dati disponibili

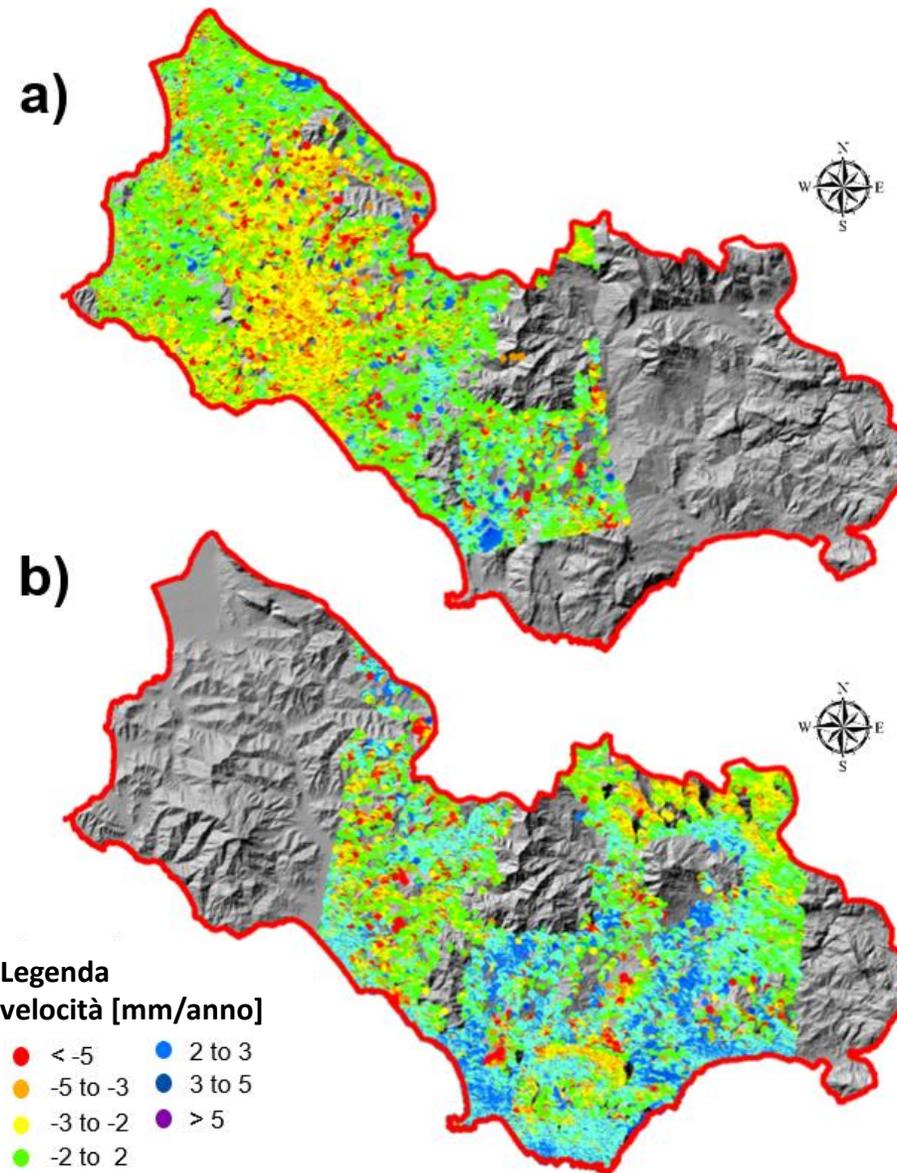


a) Carta inventario delle frane a cinematica lenta all'interno dell'area di studio e b) numero di processi di frana (per un totale di **14.843**) distinti per tipologia/stato di attività.

# Caso di studio e dati disponibili

**Orbita ascendente:** 42 immagini tra maggio 2011 e marzo 2014

**Orbita discendente:** 42 immagini tra ottobre 2011 e dicembre 2013



*Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare*

Distribuzione spaziale dei PS (con l'associata velocità media annuale lungo la LOS) ottenuta dalle immagini COSMO-SkyMed acquisite in orbita a) ascendente e b) discendente.

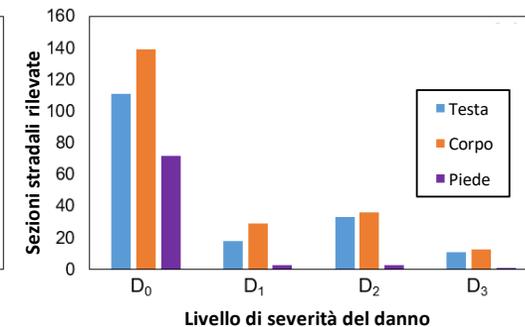
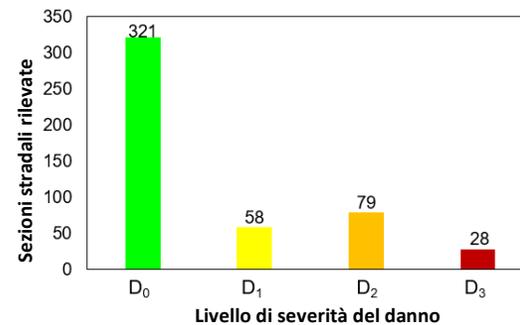
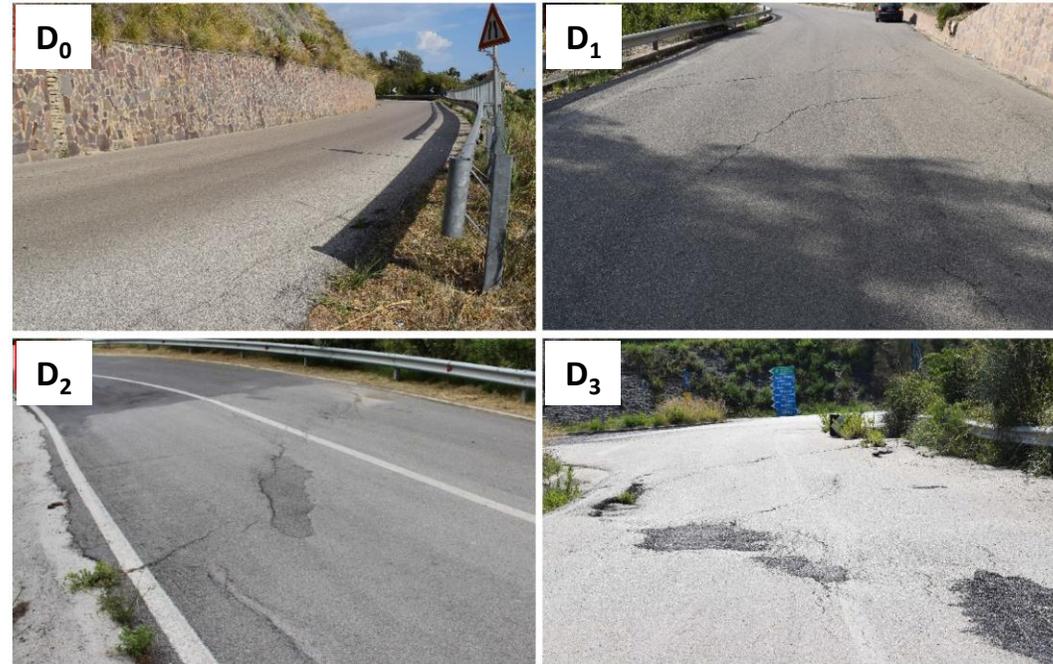
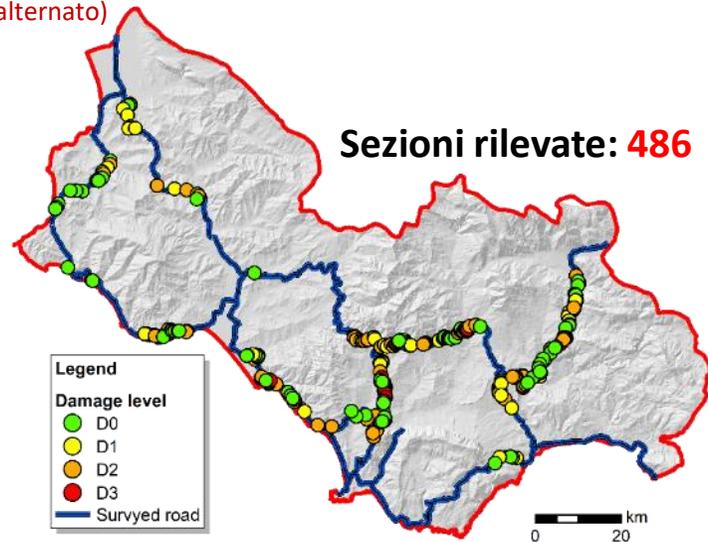
# Classificazione e rilievo del danno

**Livello di severità  $D_0$  (trascurabile):** deformazioni e fessure della pavimentazione stradale sono assenti o raramente visibili

**Livello di severità  $D_1$  (da molto basso a basso):** deformazioni e fessure interessano localmente la pavimentazione stradale senza perdite di funzionalità

**Livello di severità  $D_2$  (da moderato a grave):** deformazione e fessure interessano sensibilmente la pavimentazione stradale coinvolgendo parzialmente o interamente le corsie e/o i bordi della carreggiata con necessaria riduzione dei limiti di velocità

**Livello di severità  $D_3$  (molto grave):** deformazioni e fessure compromettono definitivamente la continuità della pavimentazione stradale coinvolgendo parzialmente o interamente le corsie e/o i bordi della carreggiata con necessarie restrizioni al traffico (ad esempio, senso unico alternato)



# Analisi di vulnerabilità – Metodologia

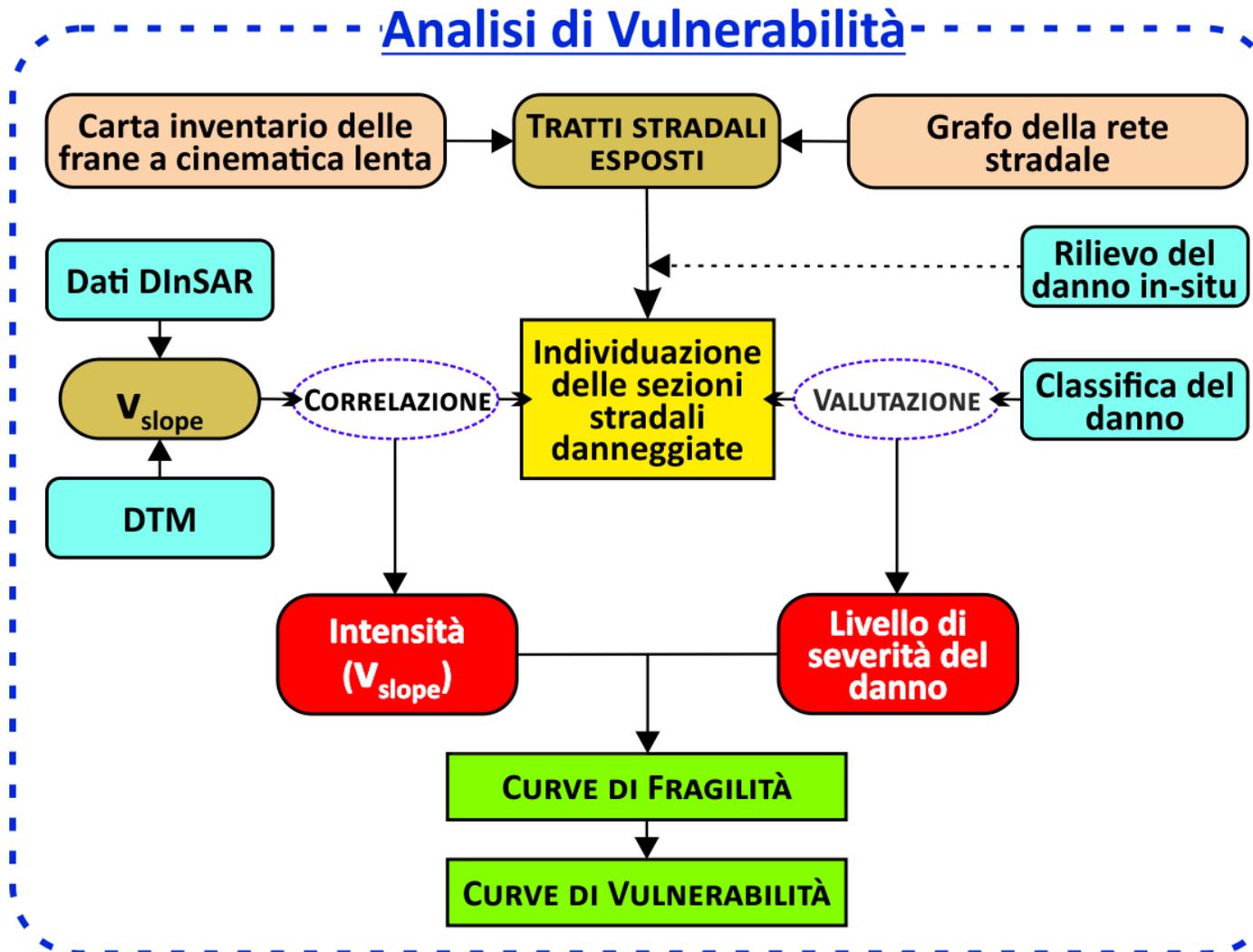
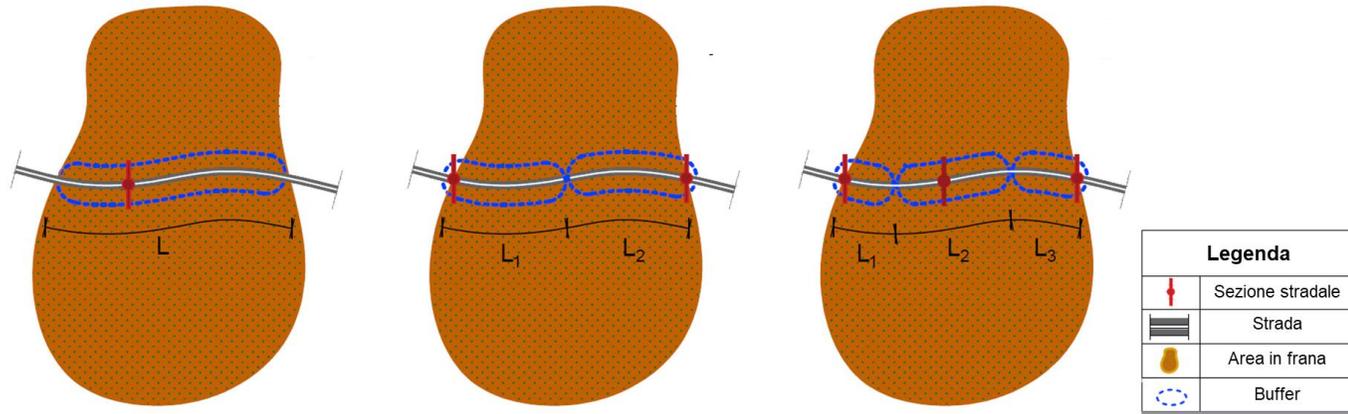


Diagramma di flusso delle attività da svolgere per l'analisi della vulnerabilità fisica di una rete stradale da frane a cinematica lenta.

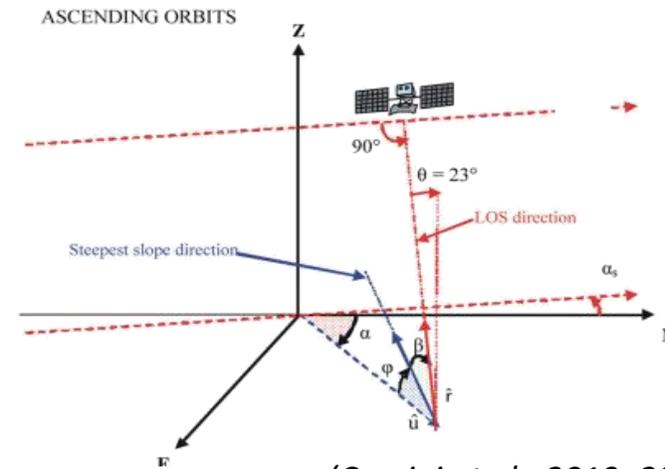
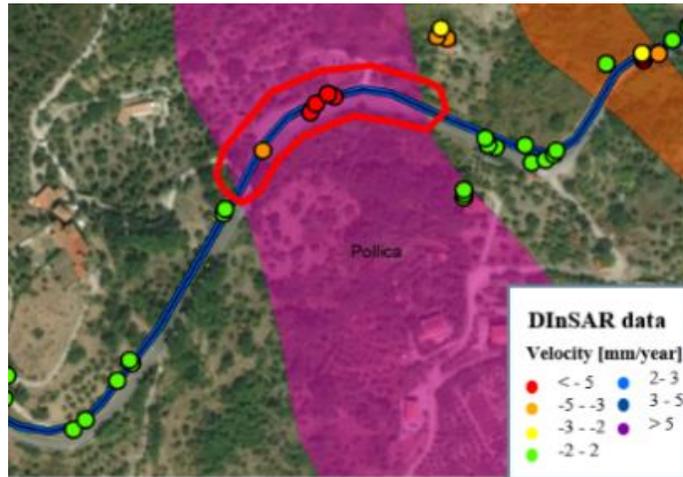
# Stima del valore del parametro d'intensità



Al fine di associare al livello di severità del danno registrato il valore di un parametro indicativo dell'intensità della frana (IM) si considera, per ogni sezione stradale individuata, un **buffer** disposto simmetricamente rispetto alla linea di mezzeria.

Il buffer ha una larghezza pari a 40 m nella direzione ortogonale alla linea di mezzeria e una lunghezza (lungo la linea di mezzeria) variabile in base al numero di sezioni stradali danneggiate e alla loro posizione relativa.

Proiezioni dei valori di  $v_{LOS}$  (velocità lungo la LOS) per ottenere  $IM = v_{slope}$  (velocità lungo la direzione di massima pendenza)



(Cascini et al., 2010, 2013)

n. di sezioni oggetto di rilievo considerate per le analisi

**Y = 168**

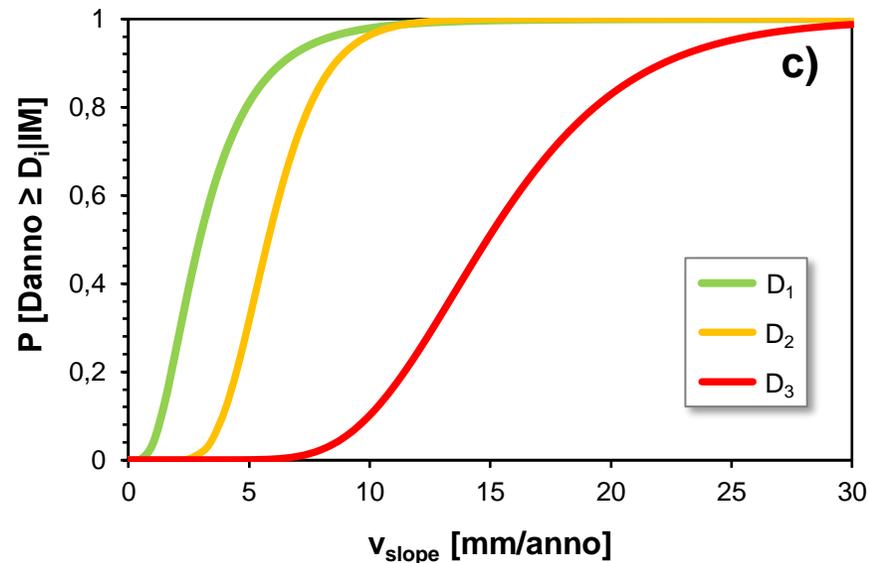
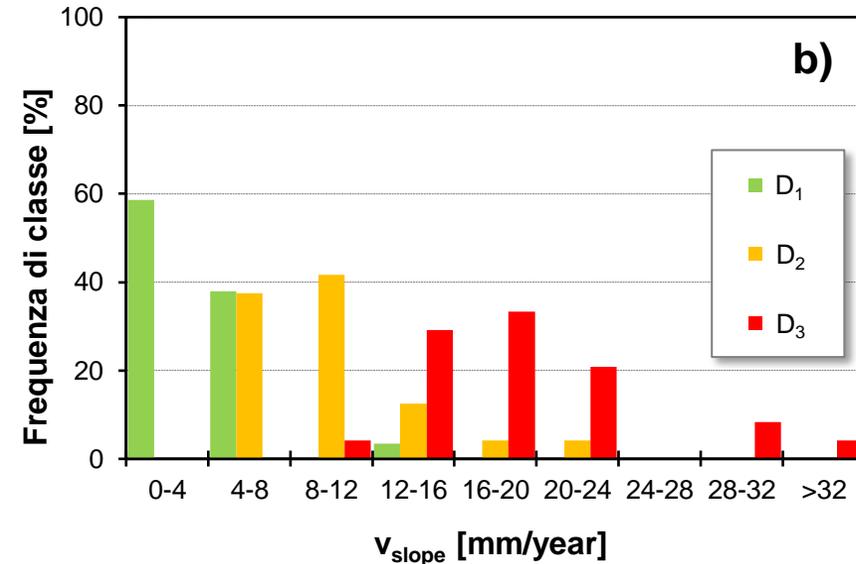
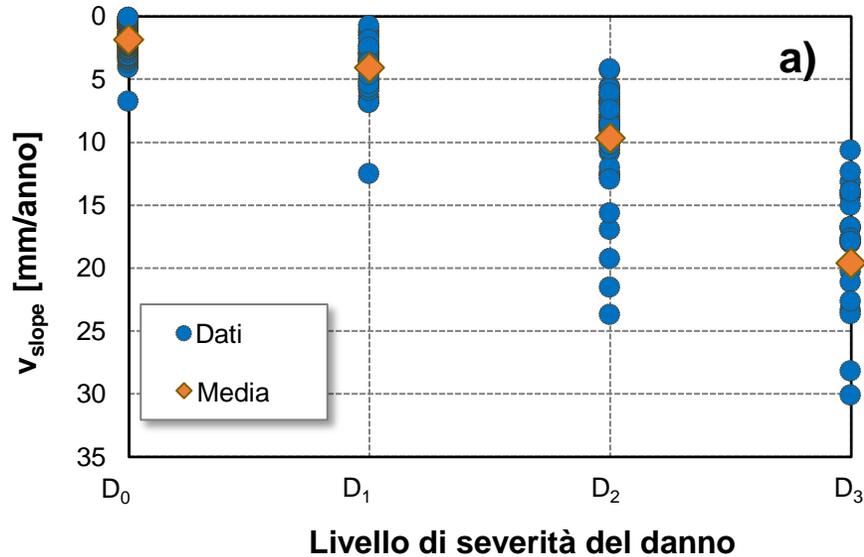
$D_0 = 67$  sezioni

$D_1 = 29$  sezioni

$D_2 = 48$  sezioni

$D_3 = 24$  sezioni

# Curve di fragilità



Le curve empiriche di fragilità sono state generate adottando una funzione di distribuzione cumulata di tipo log-normale (Shinozuka et al. 2000, 2003):

$$P(\text{Danno} \geq D_i | IM) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_i} \ln \left( \frac{IM}{\overline{IM}_i} \right) \right] \quad (i = 1, 2, 3)$$

$\Phi$  = funzione di distribuzione cumulata normale

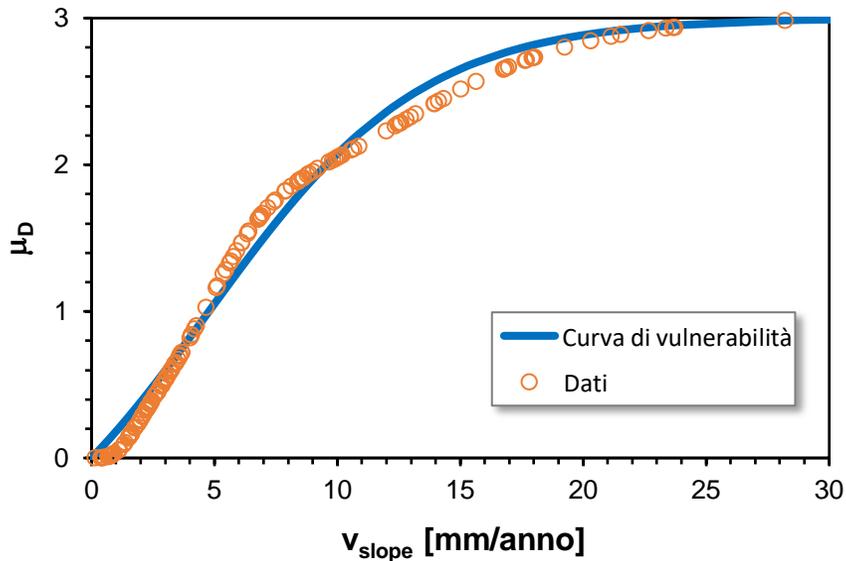
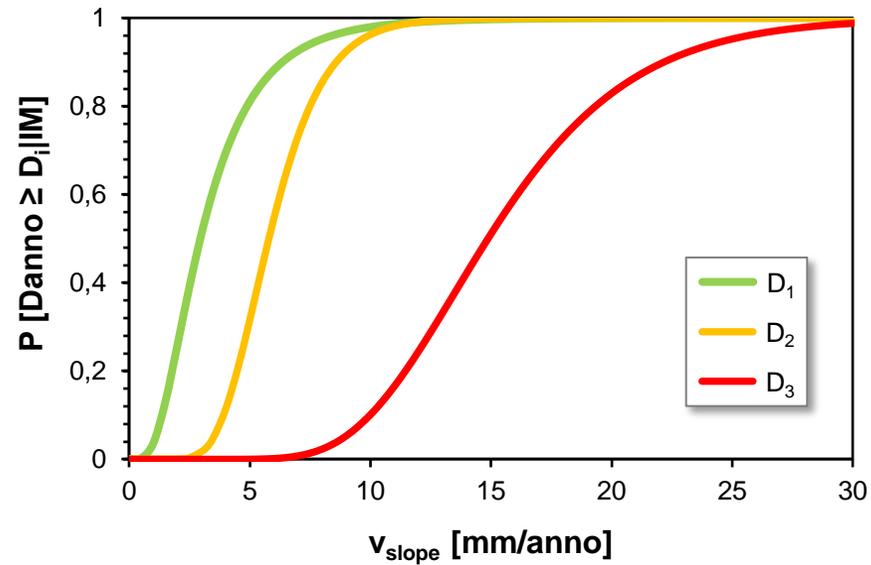
$IM$  = parametro d'intensità

$\overline{IM}$  = mediana

$\beta$  = dispersione

a) Livello di severità del danno registrati in funzione del parametro d'intensità, b) frequenza di classe dei livelli di severità del danno in base a  $v_{slope}$ , c) curve empiriche di fragilità.

# Curva di vulnerabilità



Le curve empiriche di fragilità sono state generate adottando una funzione di distribuzione cumulata di tipo log-normale (Shinozuka et al. 2000, 2003):

$$P(\text{Danno} \geq D_i | \text{IM}) = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_i} \ln \left( \frac{\text{IM}}{\overline{\text{IM}}_i} \right) \right] \quad (i = 1, 2, 3)$$

$\Phi$  = funzione di distribuzione cumulata normale

$\text{IM}$  = parametro d'intensità

$\overline{\text{IM}}$  = mediana

$\beta$  = dispersione

Una volta generate le curve di fragilità, la curva di vulnerabilità – che lega il parametro  $\text{IM}$  selezionato con il livello medio di severità del danno atteso ( $\mu_D$ ) sui tratti stradali esposti – può essere derivata interpolando i dati  $\mu_D(\text{IM}_j)$  ottenuti come (Pitilakis e Fotopoulou, 2015):

$$\mu_D(\text{IM}_j) = \sum_{i=1}^3 P_i \times d_i \quad (j = 1, \dots, Y)$$

$P_i$  = probabilità discreta associata a un livello di severità del danno ( $D_i$ )

$d_i$  = indice numerico

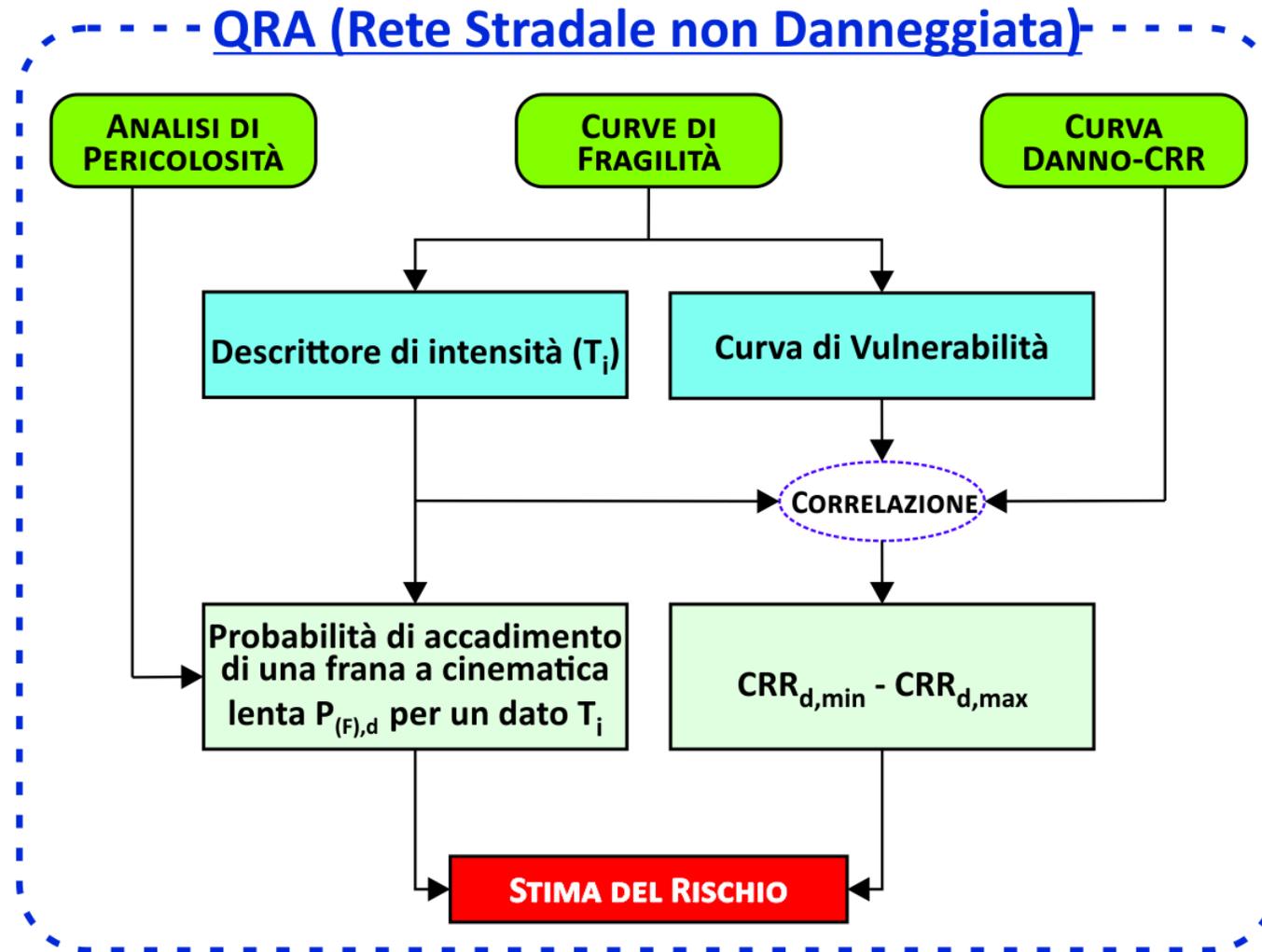
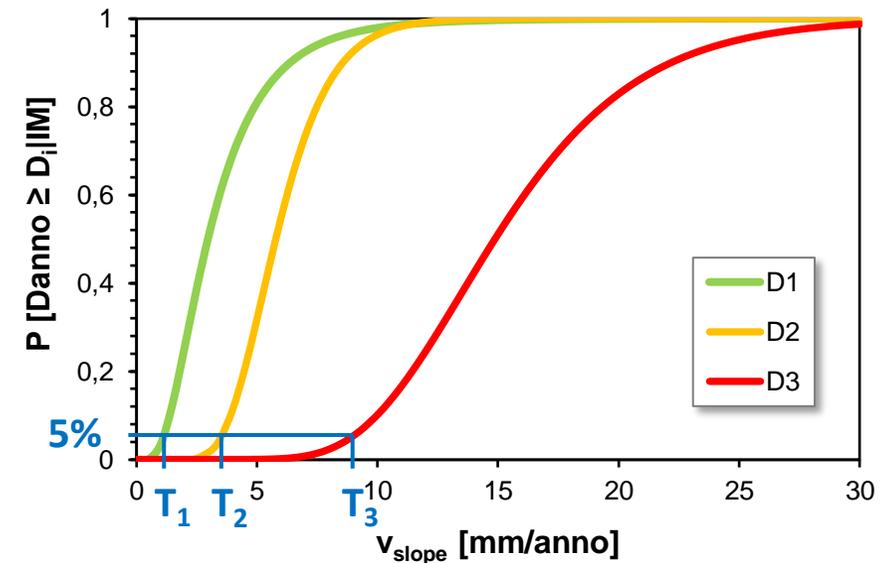


Diagramma di flusso delle attività da svolgere per l'analisi quantitativa del rischio da frane a cinematica lenta cui è esposta una rete stradale assunta non danneggiata.

# Soglie e livelli d'intensità

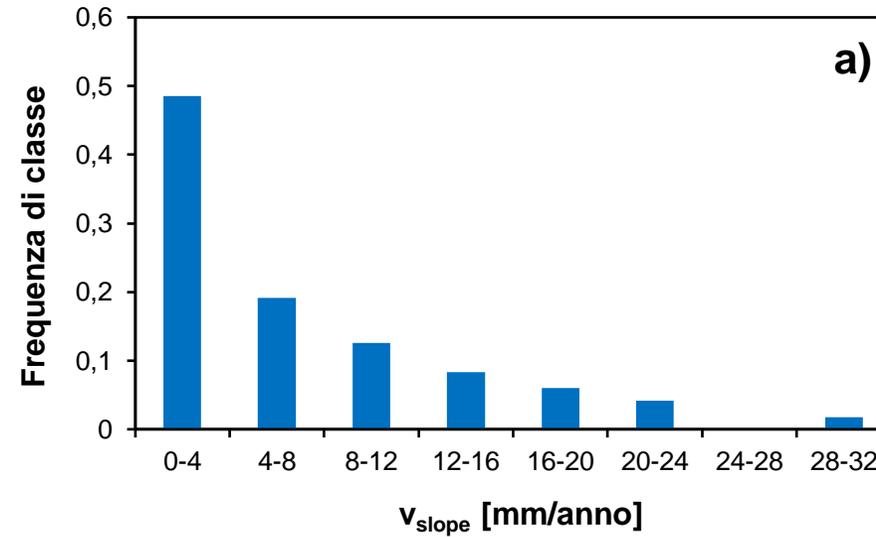
Le curve di fragilità ottenute consentono di definire **soglie di intensità** ( $T_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) da associare ad una probabilità di raggiungimento o superamento di un determinato livello di severità del danno posta pari al 5% (Zhang e Ng, 2005).

Soglia d'intensità	$v_{\text{slope}}$ [mm/anno]
$T_1$	1,1
$T_2$	3,5
$T_3$	8,9

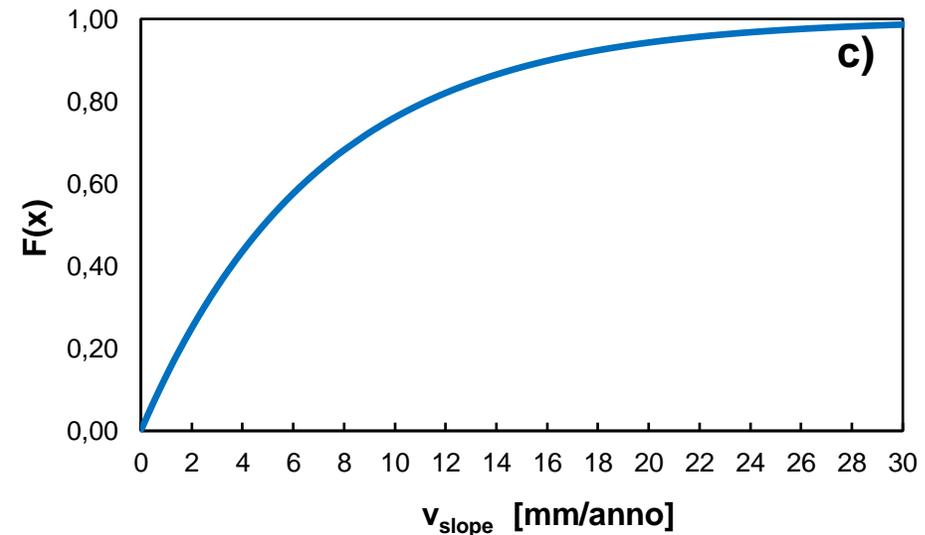
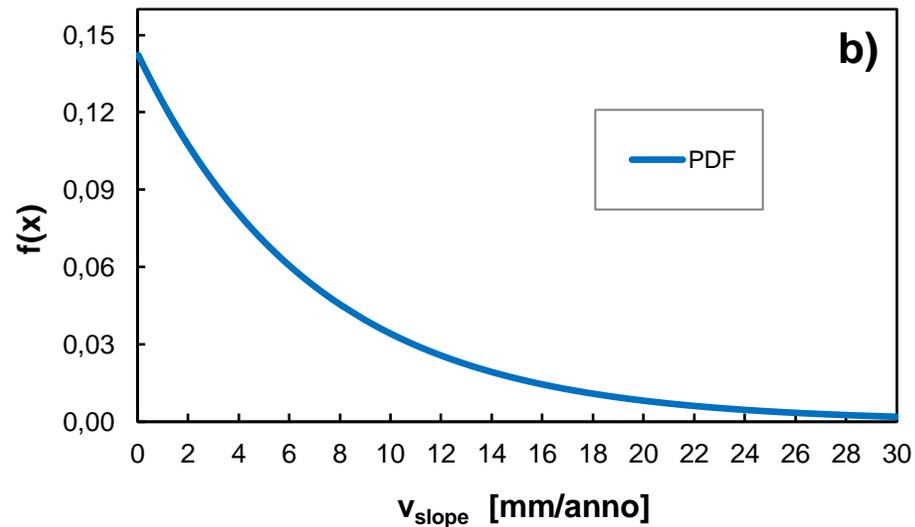


Livello d'intensità	Scala nominale
$0 < v_{\text{slope}} \leq T_1$	Trascurabile
$T_1 < v_{\text{slope}} \leq T_2$	Bassa
$T_2 < v_{\text{slope}} \leq T_3$	Moderata
$v_{\text{slope}} > T_3$	Alta

# Stima della probabilità di accadimento

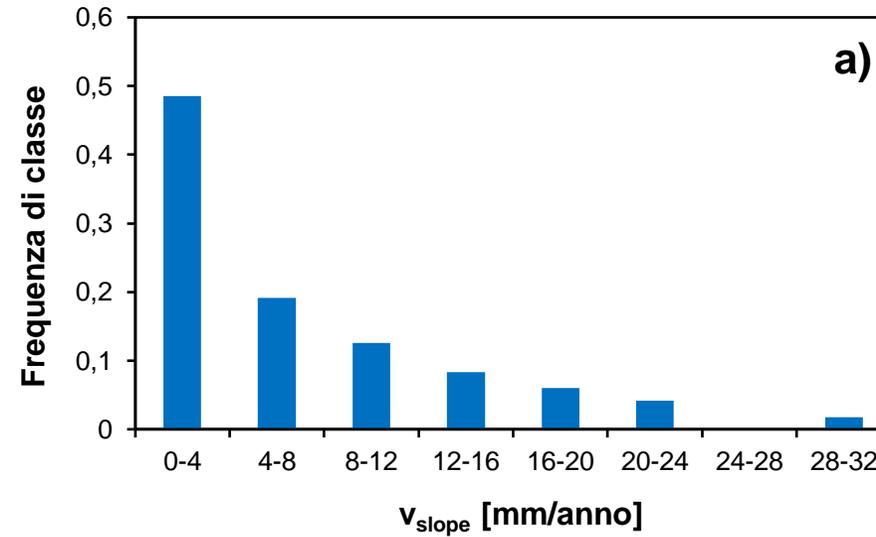


La legge di distribuzione che meglio si adatta ai dati disponibili è quella **esponenziale negativa**



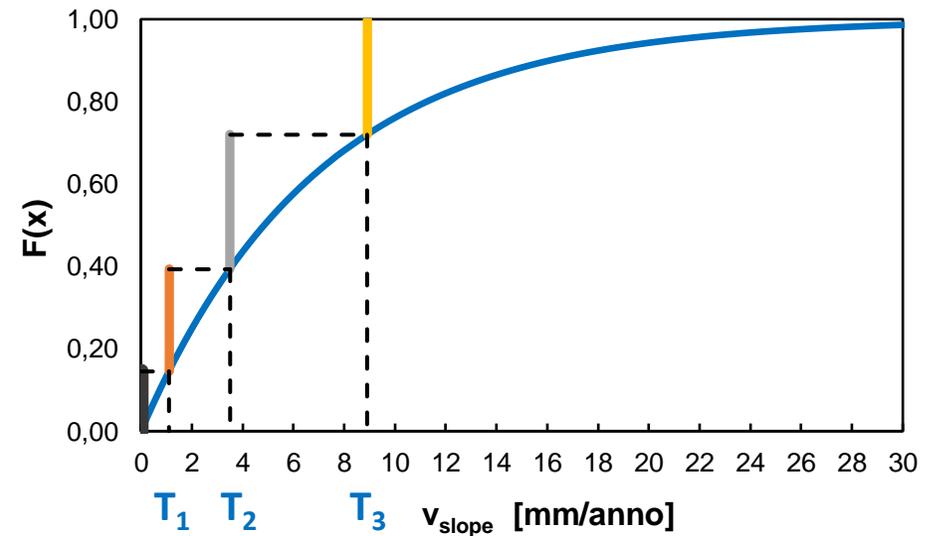
a) Frequenza di classe della  $v_{\text{slope}}$ , b) funzione di densità di probabilità (PDF) e c) funzione di probabilità cumulata della  $v_{\text{slope}}$ .

# Stima della probabilità di accadimento



La legge di distribuzione che meglio si adatta ai dati disponibili è quella **esponenziale negativa**

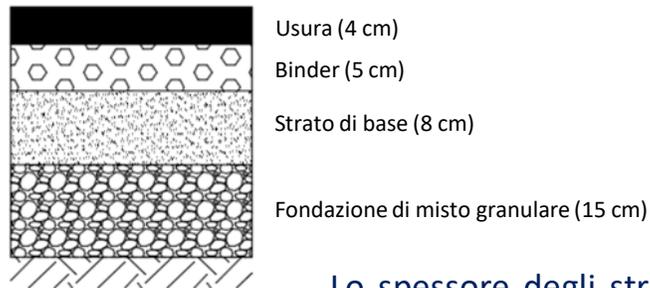
Livello d'intensità [mm/anno]	$P_{(F),d}$
$0 < v_{\text{slope}} \leq 1,1$	0,14
$1,1 < v_{\text{slope}} \leq 3,5$	0,25
$3,5 < v_{\text{slope}} \leq 8,9$	0,33
$v_{\text{slope}} > 8,9$	0,28



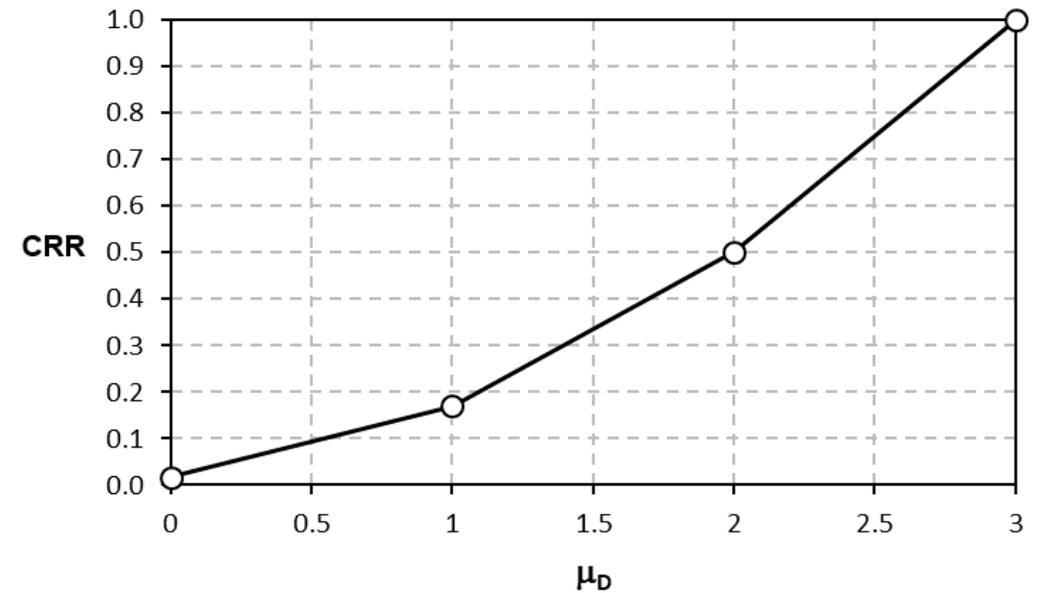
# Costo relativo di riparazione

Attività	Unità di misura	Costo [€]	Livello di severità del danno			
			D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
Sigillatura delle lesioni delle pavimentazioni	m	3,99	■	-	-	-
Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di usura (4 cm di spessore)	m <sup>3</sup>	137,86	-	■	■	■
Fresatura di strati di pavimentazione in conglomerato bituminoso	m <sup>2</sup> × cm	0,42	-	-	■	■
Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di binder (5 cm di spessore)	m <sup>3</sup>	125,61	-	-	■	■
Mano d'attacco costituita da bitume modificato con elastomeri	m <sup>2</sup>	0,71	-	-	■	■
Fornitura e posa in opera di conglomerato bituminoso per strato di base (8 cm di spessore)	m <sup>3</sup>	115,44	-	-	-	■
Fornitura e posa in opera di fondazione stradale in misto granulare stabilizzato (15 cm di spessore)	m <sup>3</sup>	19,26	-	-	-	■
<b>Costo unitario di riparazione [€/m]</b>			<b>3.99</b>	<b>38.60</b>	<b>113.99</b>	<b>227.35</b>

Attività richieste e costi da sostenere per la riparazione di strade con differente livello di severità del danno (ANAS, 2018).

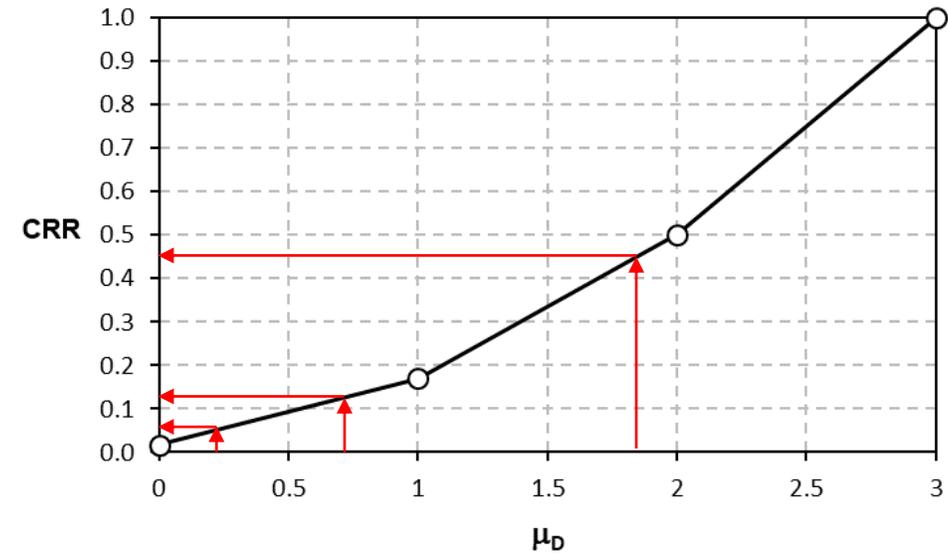
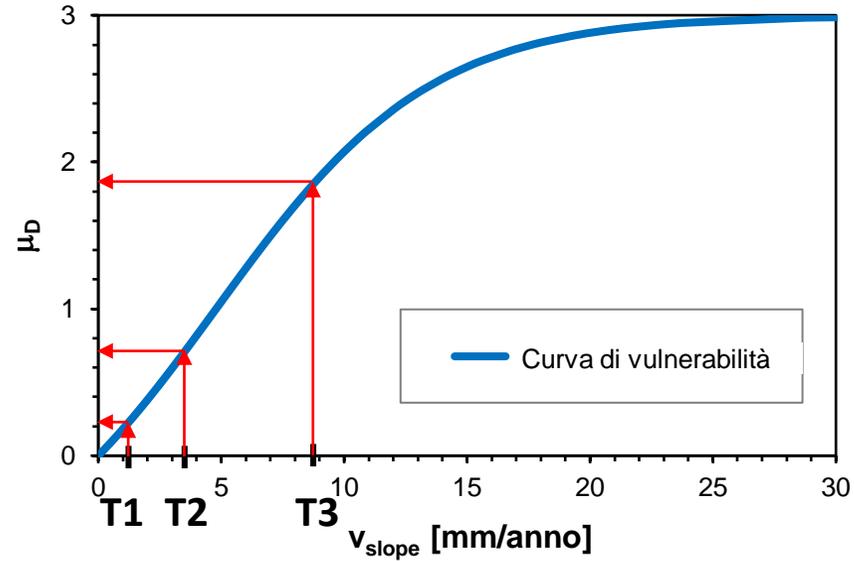


Lo spessore degli strati fa riferimento a strade extra-urbane secondarie secondo quanto riportato da Domenichini et al. (1993); la larghezza delle strade è stata posta pari a 7 m.



Costo relativo di riparazione (CRR) in funzione del danno mediamente atteso ( $\mu_D$ ).

# Costo relativo di riparazione



Livello d'intensità	$\mu_D$ (limite inferiore)	$\mu_D$ (limite superiore)	$CRR_{d,\min}$	$CRR_{d,\max}$
$0 < v_{\text{slope}} \leq T_1$	0,000	0,203	0,0175	0,0484
$T_1 < v_{\text{slope}} \leq T_2$	0,203	0,705	0,0484	0,1248
$T_2 < v_{\text{slope}} \leq T_3$	0,705	1,882	0,1248	0,4624
$v_{\text{slope}} > T_3$	1,882	-	0,4624	1,0000

# Determinazione del tempo $t^*$

Analisi dell'evoluzione del danno mediante immagini d'archivio di Google Street View



$t^*$  = tempo medio necessario al completo sviluppo del danno (cioè da  $D_0$  a  $D_3$ ) in almeno una delle sezioni stradali all'interno del periodo di osservazione (da settembre 2008 al giugno 2018 = 9,9 anni).

$t^* = 7,4$  anni

# Calcolo del rischio

Il rischio è stato stimato su base quantitativa. Esso è compreso tra un valore minimo ( $R_{(RS),min}$ ) e uno massimo ( $R_{(RS),max}$ ) in accordo con le seguenti equazioni:

$$R_{(RS),min} = \left[ P_{(F),0} \frac{\sum_{b=1}^A L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{0,min} + P_{(F),1} \frac{\sum_{b=1}^B L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{1,min} + P_{(F),2} \frac{\sum_{b=1}^C L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{2,min} + P_{(F),3} \frac{\sum_{b=1}^D L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{3,min} \right] \cdot \left( \frac{L_{ts}}{L_{rs}} \right) \cdot L_{rs} \cdot CU^*$$
$$R_{(RS),max} = \left[ P_{(F),0} \frac{\sum_{b=1}^A L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{0,max} + P_{(F),1} \frac{\sum_{b=1}^B L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{1,max} + P_{(F),2} \frac{\sum_{b=1}^C L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{2,max} + P_{(F),3} \frac{\sum_{b=1}^D L_b}{L_{DInSAR}} CRR_{3,max} \right] \cdot \left( \frac{L_{ts}}{L_{rs}} \right) \cdot L_{rs} \cdot CU^*$$

$L_b$  = lunghezza (in metri) del b-esimo buffer coperto dai dati PSI (essendo A, B, C, D il numero totale di buffer associati a frane a cinematica lenta di intensità trascurabile, bassa, moderata o alta)

$L_{DInSAR}$  = lunghezza complessiva (in metri) dei buffer coperti da dati PSI

$L_{ts}$  = lunghezza complessiva (in metri) dell'intero campione di tratti stradali esposti

$L_{rs}$  = lunghezza complessiva (in metri) dell'intera rete stradale

$P_{(F),d}$  = probabilità di accadimento di frane a cinematica lenta aventi un assegnato livello di intensità

$CRR_{i,min}$  e  $CRR_{i,max}$  = rispettivamente corrispondenti ai valori più bassi e più alti di  $\mu_D$  per i livelli d'intensità ottenuti

$CU^*$  = costo unitario (CU) di ricostruzione da riferire al tempo  $t^*$  (in anni)

$$R_{(RS),min} = 981.133 \text{ €}$$

$$R_{(RS),max} = 2.338.276 \text{ €}$$

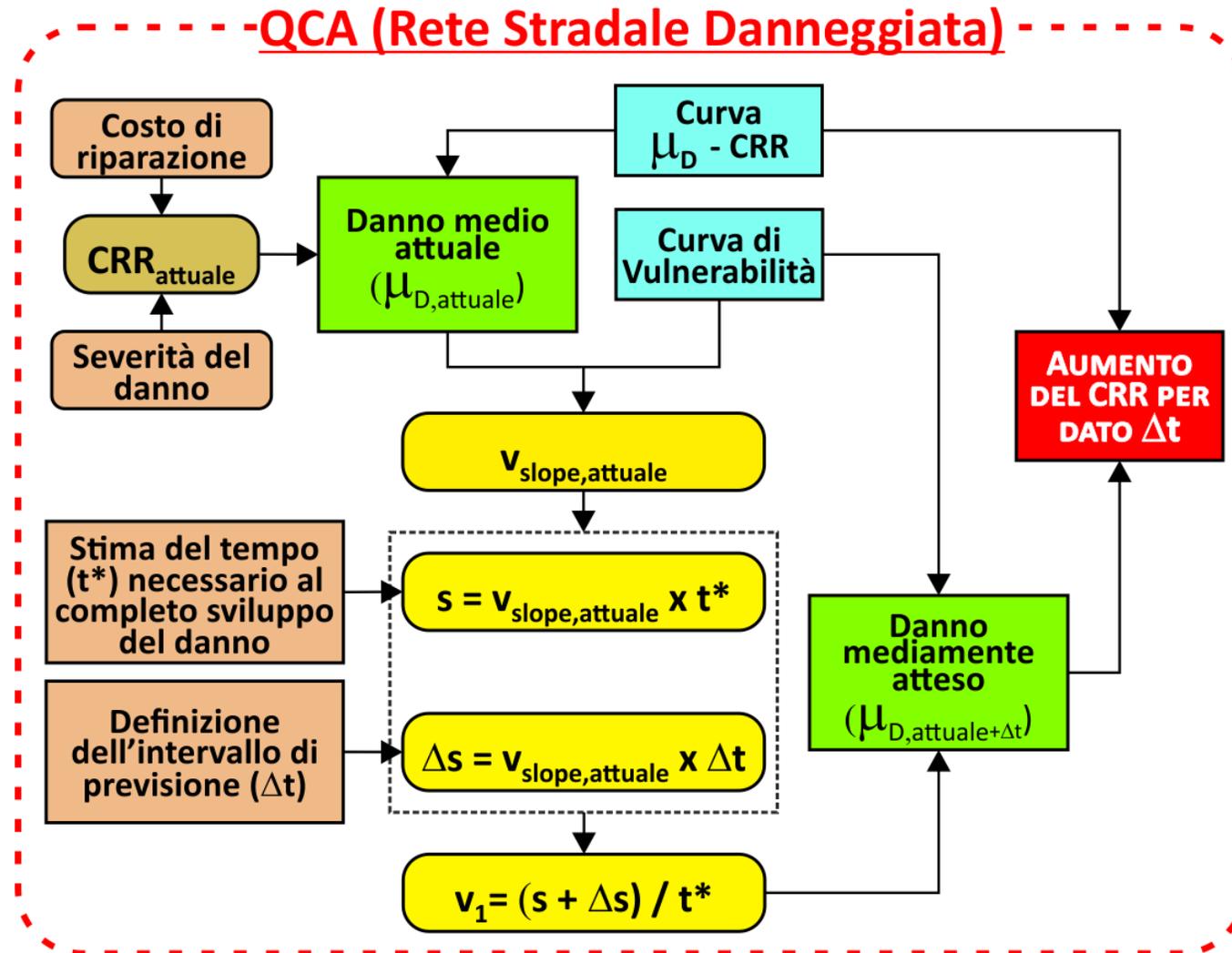


Diagramma di flusso delle attività da svolgere per l'analisi quantitativa delle conseguenze per danno diretto a una rete stradale danneggiata esposta a frane a cinematica lenta.

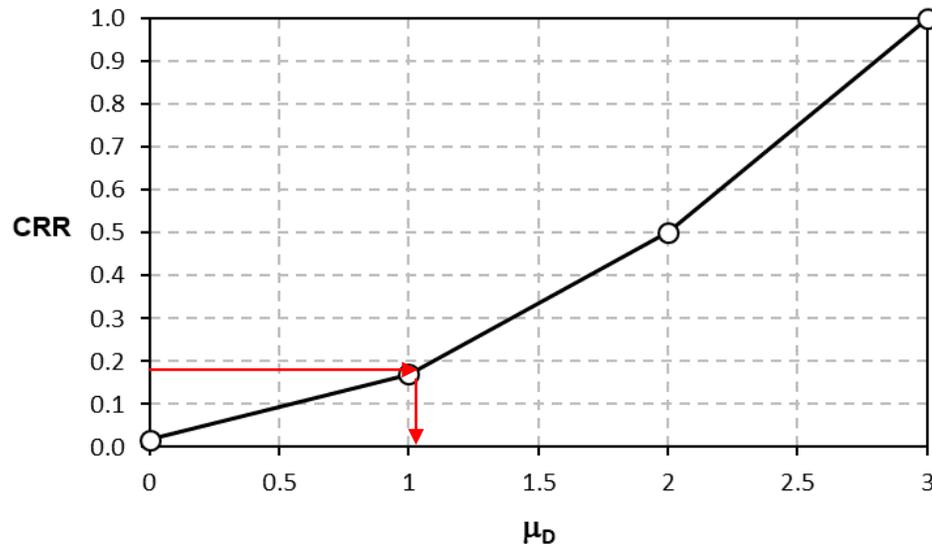
# Condizione attuale

## Calcolo del costo relativo di riparazione attuale ( $CRR_{\text{attuale}}$ )

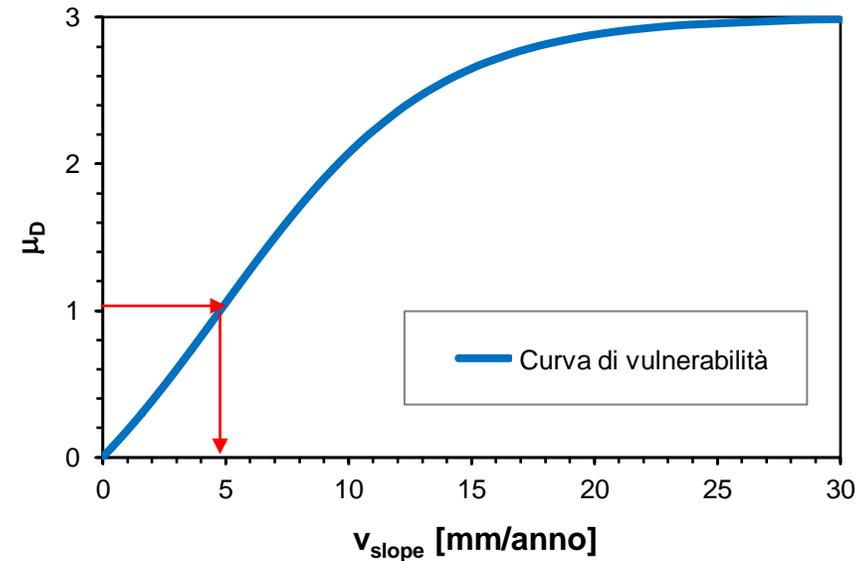
della rete stradale, considerando l'intero campione ( $X$ ) di sezioni stradali che presentano danni, mediante l'equazione:

$$CRR_{\text{attuale}} = \frac{CRR_0 \sum_{b=1}^P L_b + CRR_1 \sum_{b=1}^Q L_b + CRR_2 \sum_{b=1}^R L_b + CRR_3 \sum_{b=1}^S L_b}{\sum_{b=1}^{P+Q+R+S} L_b} = 0,178$$

## Determinazione di $v_{\text{slope,attuale}}$



$$\mu_D = 1,02$$



$$v_{\text{slope,attuale}} = 4,9 \text{ mm/anno}$$

# Intervallo previsionale

Intervallo previsionale ( $\Delta t$ ) = 5 anni

$v_{\text{slope}} = \text{costante}$

$$\Delta s = v_{\text{slope,attuale}} \times \Delta t$$

$\Delta s = 24,5 \text{ mm}$

Determinazione del tempo ( $t^*$ )

$t^* = \text{tempo medio necessario al completo sviluppo del danno (cioè da } D_0 \text{ a } D_3) = 7,4 \text{ anni}$

Analisi dell'evoluzione del danno mediante immagini d'archivio di Google Street View

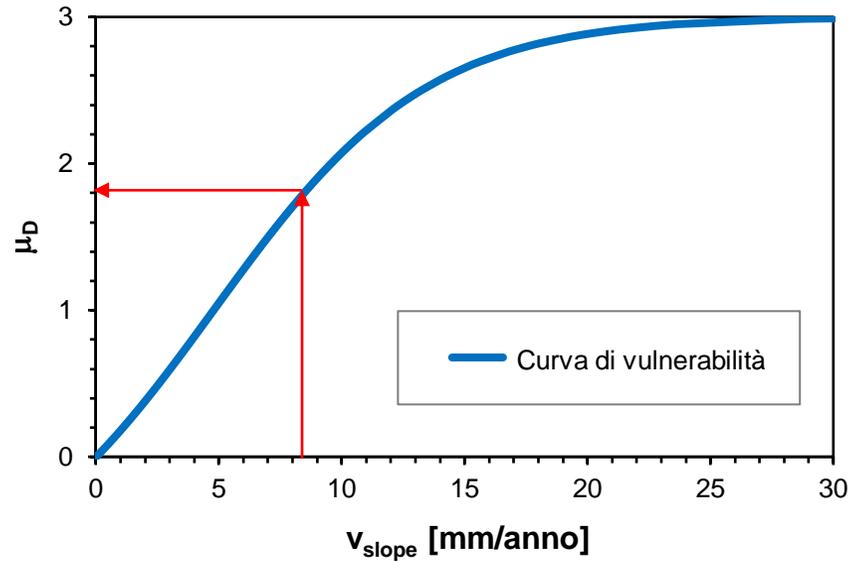


$s = \text{spostamento cumulato mediamente registrato dai corpi di frana in un tempo } t^* = v_{\text{slope,attuale}} \cdot t^* = 36,2 \text{ mm}$

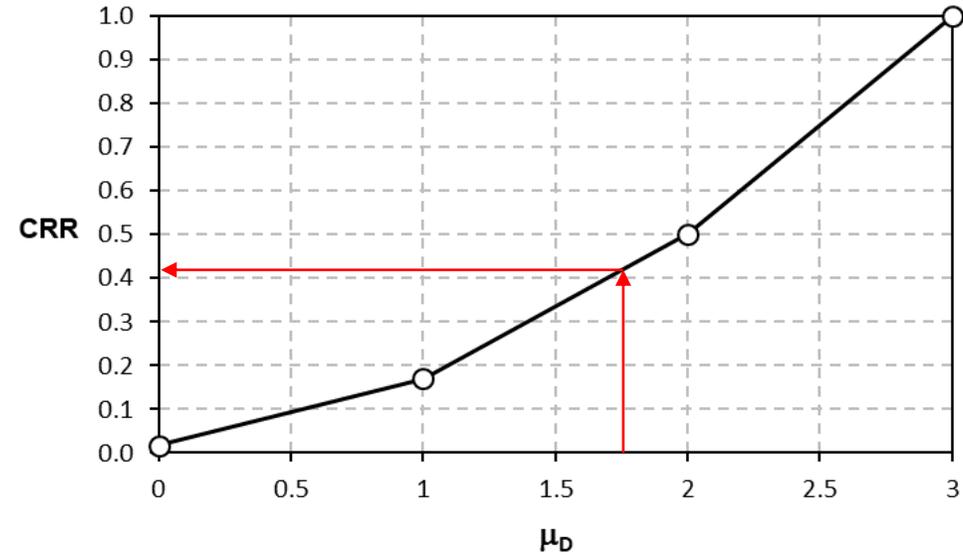
$$v_1 = (s + \Delta s) / t^* = 8,2 \text{ mm/anno}$$

$v_1$  è la velocità media lungo la direzione di massima pendenza che si rende necessaria per avere al tempo  $t^*$  un valore medio dello spostamento cumulato pari a  $s + \Delta s$

# Previsione dei costi relativi di riparazione



$$\mu_{D, \text{attuale} + \Delta t} = 1,75$$



$$CRR_{\text{attuale} + \Delta t} = 0,417$$

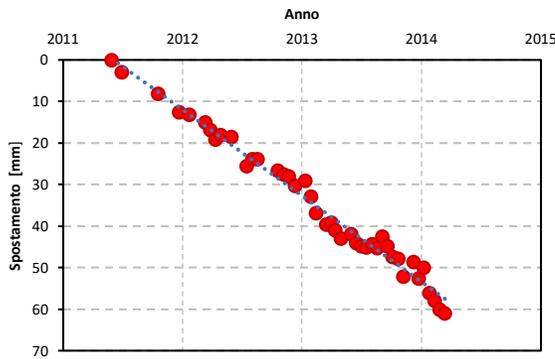
Incremento di CRR per un assegnato  $\Delta t = 5$  anni

$$\Delta RRC = RRC_{\text{attuale} + 5} - RRC_{\text{attuale}} = 0,239$$

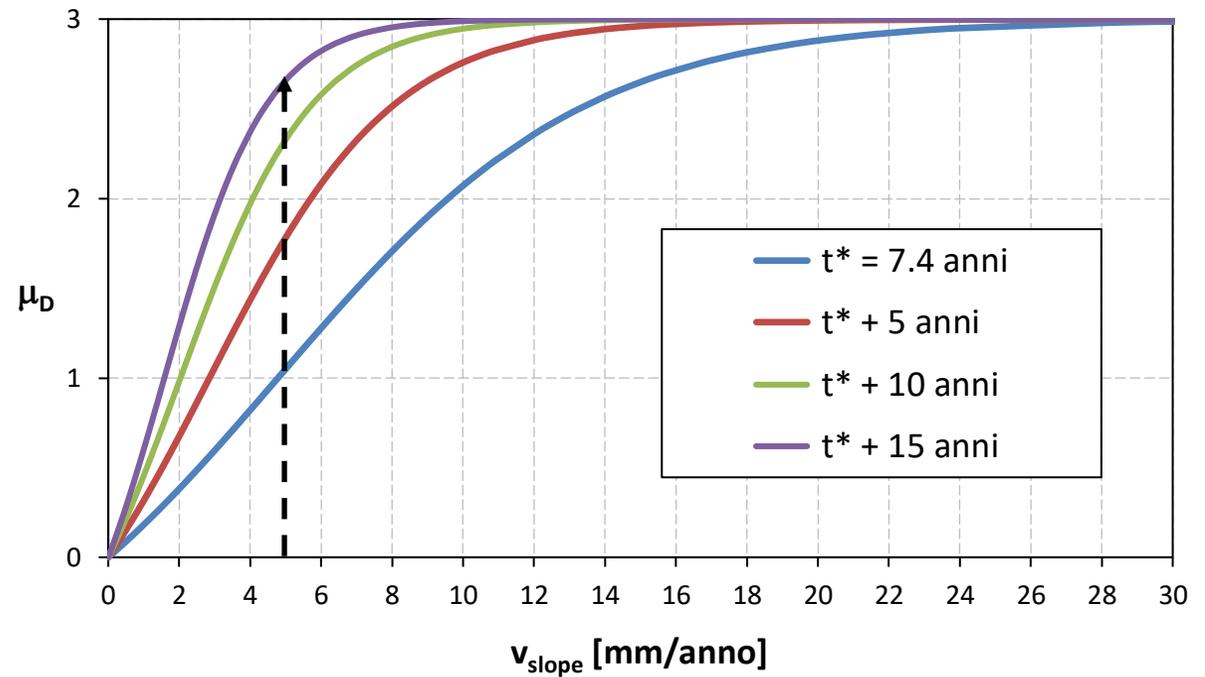
# Incremento della vulnerabilità nel tempo

L'ipotesi che i corpi di frana si muovano con una velocità  $v_{\text{slope}}$  costante consente la generazione, punto per punto, di una curva di vulnerabilità riferita al tempo  $t$  basata su quella disponibile che si riferisce a  $t^*$ .

Serie temporale degli spostamenti per un PS lungo la ex Strada Statale 267 – Comune di Pollica (SA)



$v_{\text{slope}} = \text{costante}$



# Previsione del danno diretto e indiretto – Metodologia e indicatori

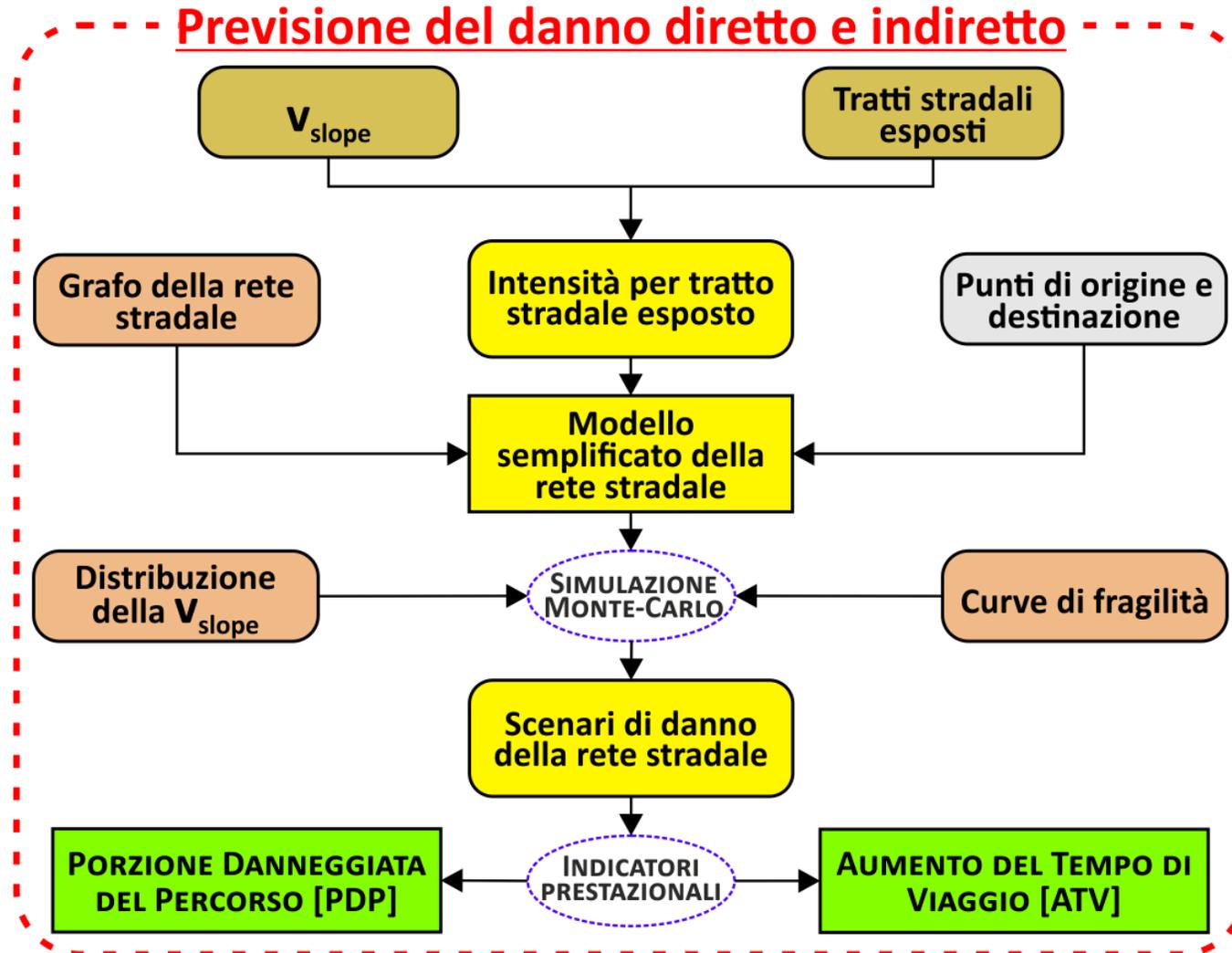


Diagramma di flusso delle attività da svolgere per la previsione del danno diretto e indiretto a una rete stradale non danneggiata esposta a frane a cinematica lenta.

**Porzione Danneggiata del Percorso (PDP)**, che è una misura diretta del danno – di livello  $D_2$  (da moderato a grave) o  $D_3$  (molto grave) – subito da una strada che, collegando una data coppia di punti origine-destinazione, corrisponde al per-corso più breve (in termini di tempo di percorrenza). Tale indicatore può essere ottenuto come:

$$PDP = \frac{L_{MED}}{L_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

dove  $L_{MED}$  è il valore medio (per come deriva dall'analisi probabilistica) della lunghezza della porzione del percorso che risulta severamente danneggiata e  $L_0$  è la lunghezza del percorso più breve.

**Aumento del Tempo di Viaggio (ATV)** impiegato da un veicolo che si muove lungo il percorso più breve tra una determinata coppia di punti origine-destinazione, (adattato da Gehl et. al., 2017):

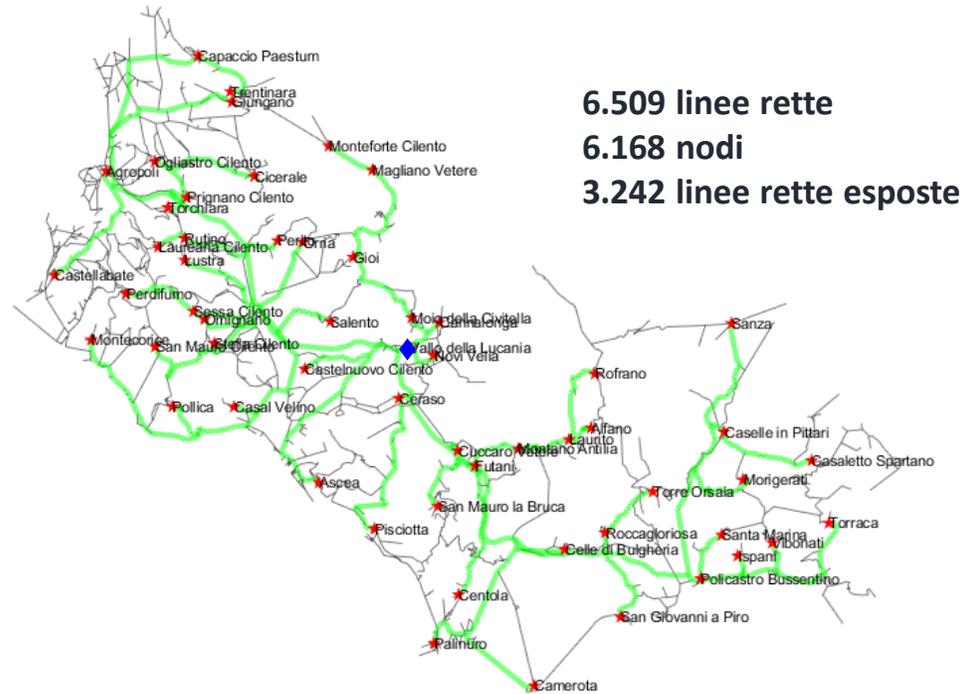
$$ATV = \frac{TV_{MED} - TV_0}{TV_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

dove  $TV_{MED}$  è il tempo di viaggio medio (per come deriva dall'analisi probabilistica) nelle condizioni di strada danneggiata, mentre  $TV_0$  è il tempo di viaggio nelle condizioni di strada non danneggiata.

# Ipotesi di lavoro



- rete di calcolo inizialmente non danneggiata;
- condizioni di flusso libero (ovvero i flussi di traffico e la congestione della rete sono trascurabili);
- punto di destinazione prestabilito; ♦
- percorso stradale considerato fisso per ciascuna coppia di punti origine-destinazione presi in esame.



## Attributi delle linee rette

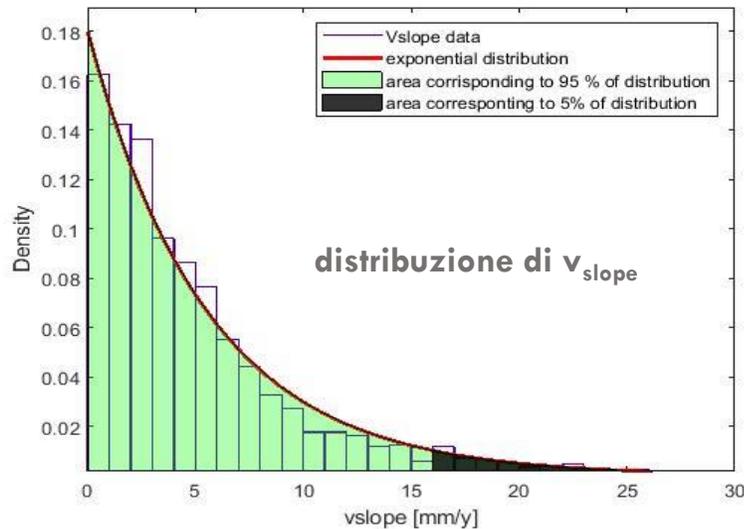
- Classificazione amministrativa del tratto stradale di origine
- velocità di marcia in condizioni di flusso libero
- la tipologia di frana a cinematica lenta eventualmente interagente con il tratto stradale di origine
- Il relative valore dell'IM (se applicabile)
- la lunghezza del tratto stradale di origine

**Origine (O)**                      **Destinazione (D)**  
Centri dei 58 Comuni   Ospedale di Vallo della Lucania

Si è ricavato il percorso più breve (**linee verdi**) per ciascuna coppia di punti O-D...

... in termini di tempo di viaggio in condizioni di flusso libero ( $TV_0$ ) usando come velocità di marcia:  
per la Strada Provinciale SP430 → 80 km/h  
per le strade rimanenti → 50 km/h

## 1.351 su 3,242 linee rette esposte non sono coperte da dati DInSAR



Per superare la difficoltà legata alla mancanza di informazioni su IM:

**Hp 1:** condizioni stabili  $\rightarrow v_{slope} = 0$  mm/anno

**Hp 2:**  $v_{slope} = 16.6$  mm/anno, per la quale la probabilità che il valore (reale, ma incognito) della  $v_{slope}$  non superi il valore scelto ( $v_{slope,95}$ ) è pari al 95%

### Perdita di funzionalità in termini di riduzione della velocità

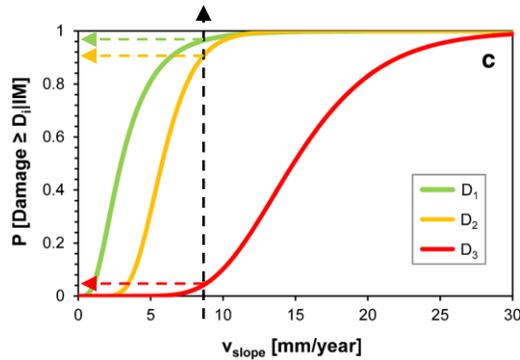
Danno diretto atteso  $D_0 \rightarrow$  nessuna riduzione di velocità

Danno diretto atteso  $D_1 \rightarrow$  nessuna riduzione di velocità

Danno diretto atteso  $D_2 \rightarrow$  velocità =  $0,5 \times$  velocità in condizioni di flusso libero

Danno diretto atteso  $D_3 \rightarrow$  velocità =  $0,1 \times$  velocità in condizioni di flusso libero

Per ciascuna delle  $k$ -esime linee rette esposte (su un totale di  $S = 3.242$ ),  $v_{\text{slope}}$  è disponibile o fissato



$P_k(D_1)$   
 $P_k(D_2)$   
 $P_k(D_3)$

## Analisi stocastica (simulazione Monte Carlo)

La distribuzione probabilistica della variabile casuale  $U$  è stata assunta uniforme

Numero totale di simulazioni ( $N$ ) = 1.000

Matrice di probabilità

$$\begin{bmatrix} P_1(D_1) & P_1(D_2) & P_1(D_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_S(D_1) & P_S(D_2) & P_S(D_3) \end{bmatrix}$$

$$\leq \begin{bmatrix} U_{1,i} \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{S,i} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} DS_{1,i} \\ \vdots \\ \vdots \\ DS_{S,i} \end{bmatrix}$$

Livello di severità del danno (DS)  
per ciascuna linea retta esposta per  
la  $i$ -esima simulazione

1,000 simulazioni

$[3,242 \times 1,000]$

$$[U_{k,i} \quad U_{k,i} \quad U_{k,i}] \geq [P_k(D_1) \quad P_k(D_2) \quad P_k(D_3)]$$

per es.,      **no**      **no**      **si**

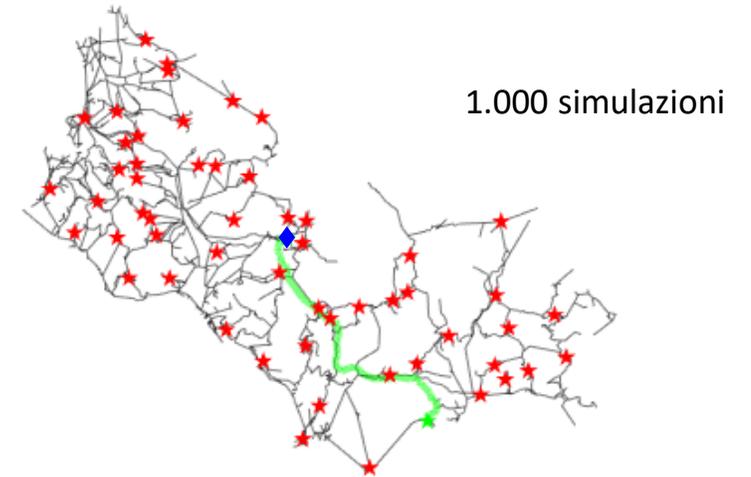
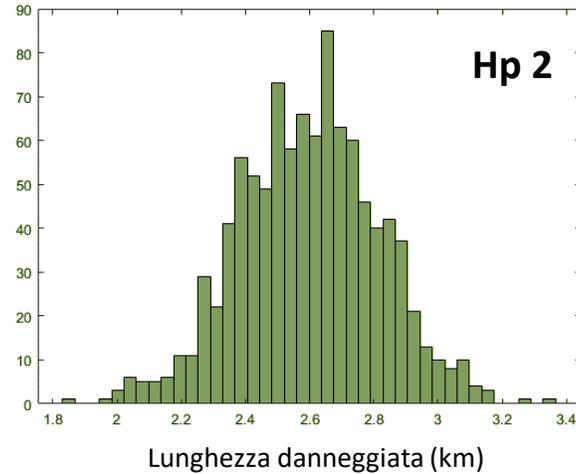
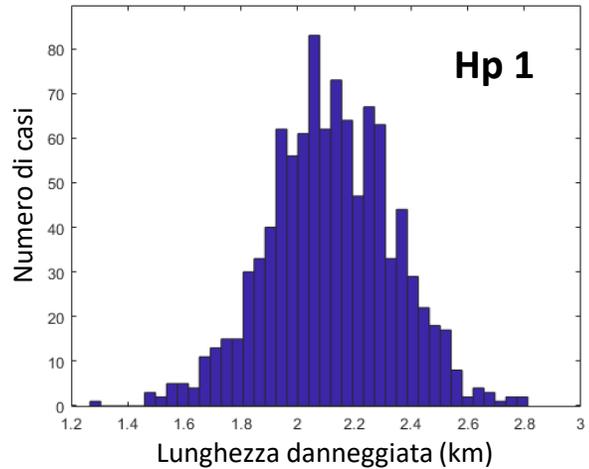
$$[ \quad 0 \quad \quad 0 \quad \quad 1 \quad ]$$



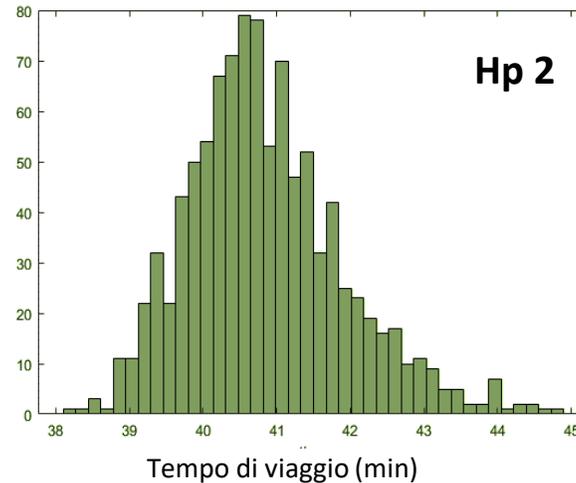
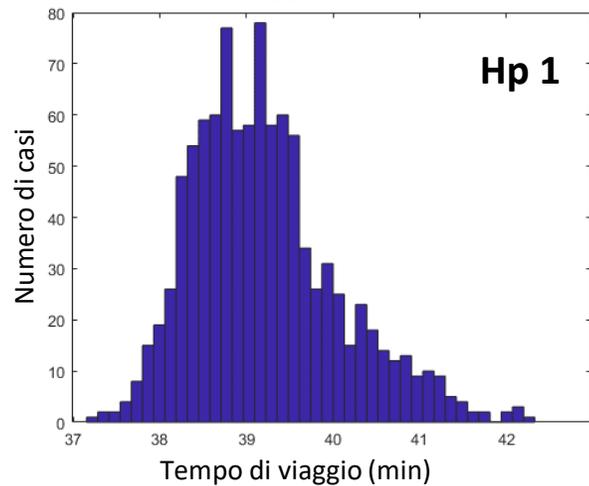
$$DS_i = 3 - (0 + 0 + 1) = 2$$

## San Giovanni a Piro (O) – Ospedale di Vallo della Lucania (D)

### ❖ Lunghezza danneggiata



### ❖ Tempo di viaggio



PDP (Hp 1) = 5,65 %

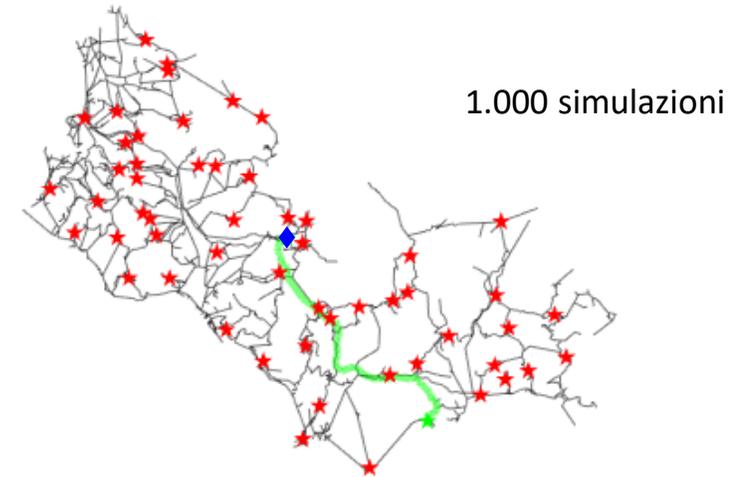
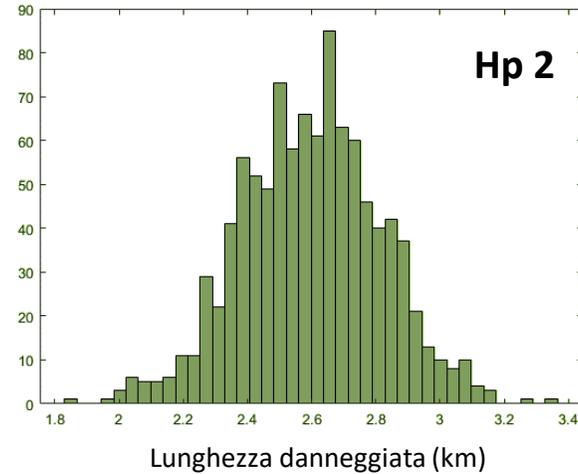
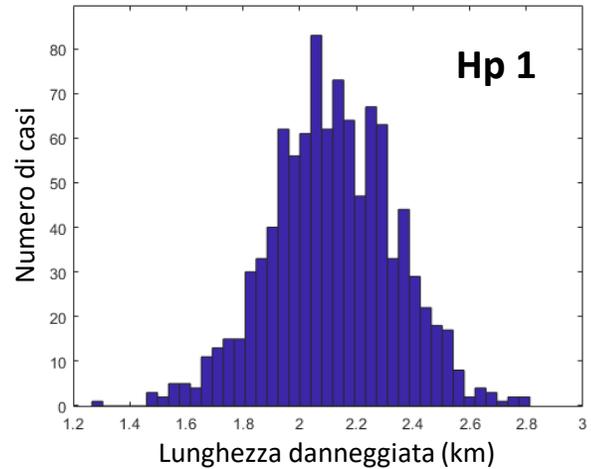
PDP (Hp 2) = 6,93 %

ATV (Hp 1) = 20,99 %

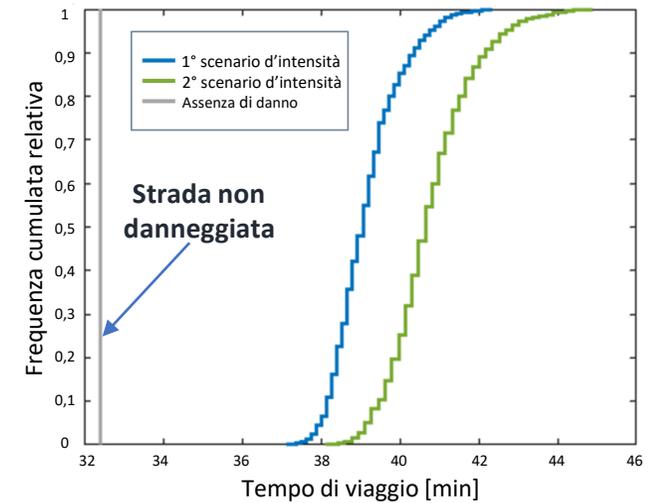
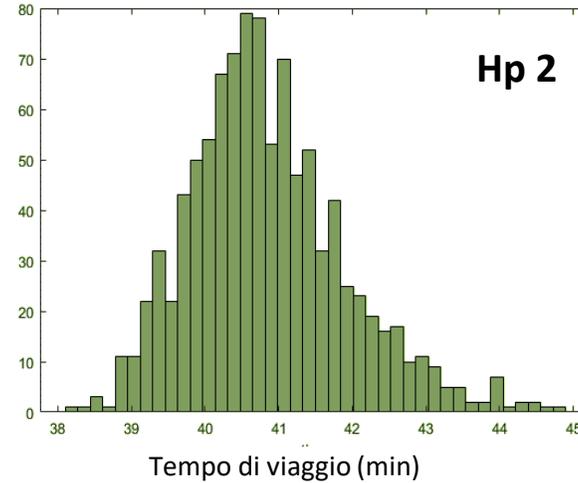
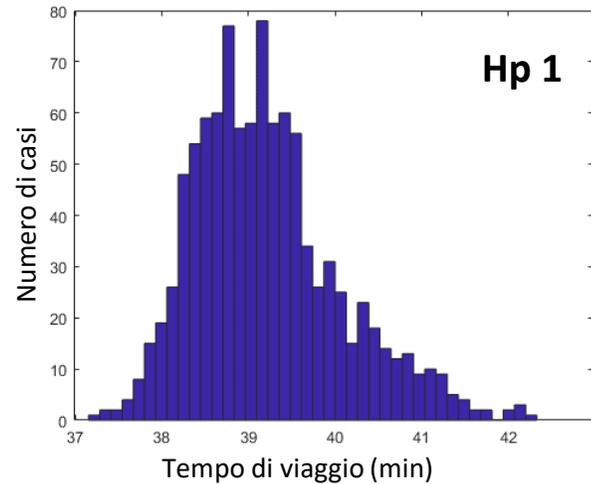
ATV (Hp 2) = 26,03 %

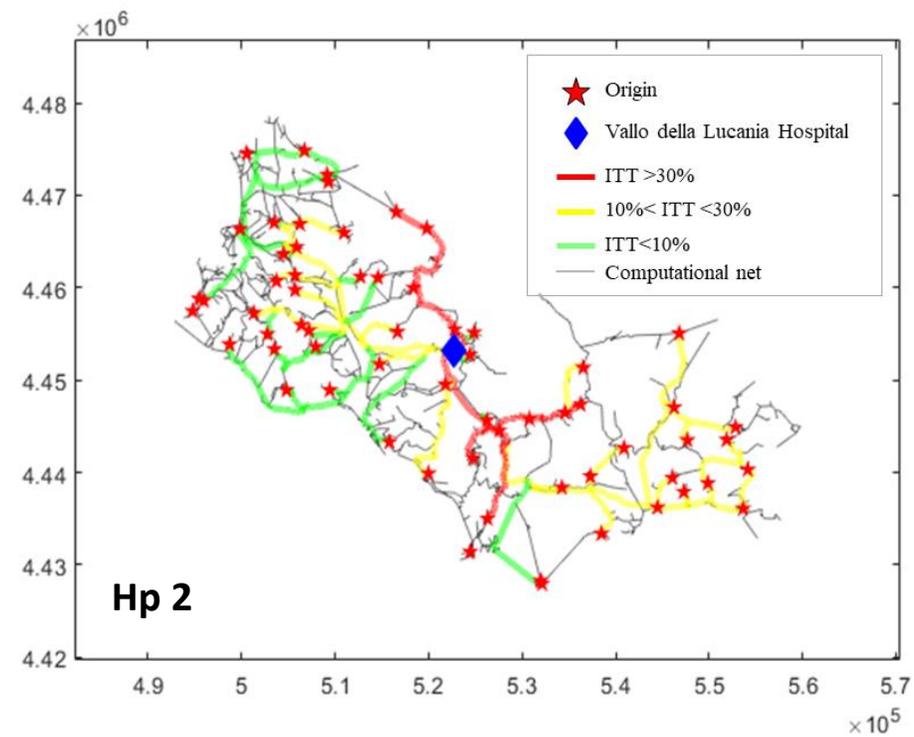
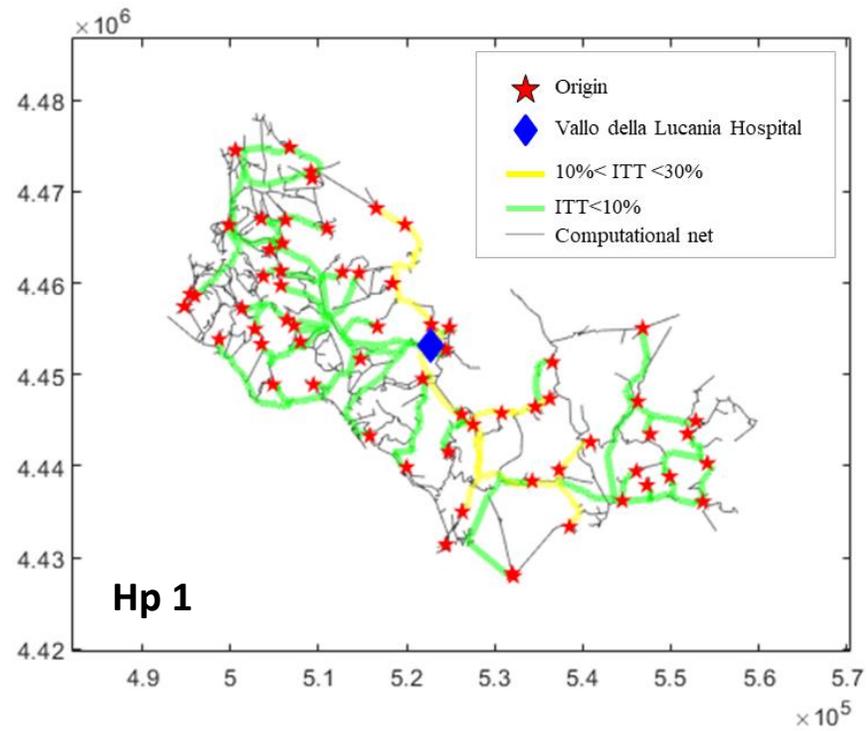
## San Giovanni a Piro (O) – Ospedale di Vallo della Lucania (D)

### ❖ Lunghezza danneggiata



### ❖ Tempo di viaggio





Mappe dei 58 percorsi più breve in accordo con fissati valori di ATT

# Conclusioni

Nella presente relazione si sono mostrati i risultati di uno studio volto a **stimare quantitativamente** – a grande scala (1:5.000) – il rischio (**QRA**)/le conseguenze dirette (**QCA**) per una rete stradale non danneggiata/danneggiata esposta a frane a cinematica lenta. Con riferimento ad un caso di studio nella Regione Campania, le analisi si sono giovate della disponibilità di dati DInSAR ad altissima risoluzione e di informazioni sulla severità del danno. Le procedure proposte hanno consentito di dare **risposta** ad alcune domande aperte nella letteratura scientifica sull'analisi della pericolosità (ad esempio in termini di **probabilità di accadimento di frane a cinematica lenta di assegnata intensità**, a loro volta stabilite sulla base di curve empiriche di fragilità) e sull'analisi delle conseguenze (ad esempio in termini di **curve di vulnerabilità dipendenti dal tempo**).

D'altra parte, l'adozione del metodo Monte Carlo ha consentito di quantificare due **indici prestazionali** la cui conoscenza abilita *i*) all'identificazione dei percorsi più vulnerabili e *ii*) alla corretta comprensione del funzionamento di una rete stradale esposta al rischio da frane a cinematica lenta su un assegnato periodo di osservazione.

***Quali ricadute? E quali i possibili sviluppi?***

# Conclusioni

## Ricadute

### *Uso del QRA per fini gestionali*

Con riferimento alla rete stradale primaria oggetto di studio, le autorità preposte potrebbero decidere di mitigare il rischio riducendo la pericolosità delle frane a cinematica lenta interagenti con le sezioni stradali coperte da dati DInSAR e aventi un livello d'intensità elevata (indipendentemente dalla severità del danno registrata) mediante interventi di stabilizzazione. Atteso che tutte le sezioni stradali siano state riparate in concomitanza della realizzazione dei predetti interventi, le equazioni del QRA consentono di pervenire a valori di rischio residuo massimo e minimo (mantenendo fissi i valori soglia dei livelli di intensità e ponendo la probabilità  $P_{(F),3} = 0$ ).

### *Uso del QCA per fini gestionali*

Le Autorità preposte potrebbero decidere di posporre la realizzazione degli interventi di mitigazione del rischio. Il QCA consente di calcolare l'incremento del costo di ricostruzione di tutti i tratti stradali esposti.

## Sviluppi

Ulteriori approfondimenti del lavoro svolto riguardano l'applicazione del QRA/QCA a scala di dettaglio ( $> 1:5.000$ ), a condizione che vengano acquisiti dati di maggiore qualità e quantità sia per le singole frane a cinematica lenta sia per i singoli tratti stradali esposti. Ciò consentirebbe di stilare una classifica dei tratti per i quali è prioritaria la mitigazione del rischio e di pervenire a una corretta scelta/progettazione degli interventi. D'altra parte, l'applicazione di procedure avanzate nel campo dei Sistemi di Trasporto potrebbe migliorare sensibilmente l'uso degli strumenti probabilistici in questa sede proposti per quantificare il danno indiretto.