POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'ambiente ed il territorio

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi del rischio connesso alla stabilità delle coste alte: un caso in Sicilia nord-occidentale

Relatore:

Prof.ssa Monica Barbero

Correlatori:

Prof.ssa Chiara Cappadonia

Prof.ssa Marta Castelli

Ing. Maria Lia Napoli

Ing. Giulia Torsello

Candidato:

Francesco Rizzo

INDICE

Capitolo 1 Crolli in roccia 3

1.1 Fenomeni franosi in Italia 3

1.2 Aspetti generali 4

1.3 Il fenomeno della caduta massi 6

1.3.1 Dinamica del fenomeno 8

1.4 Analisi di propagazione dei massi con metodi semplificati 14

1.4.1 Il plug-in QProto 17

Capitolo 2 Caratteristiche dell'area di Monte Pellegrino e quadro normativo 22

2.1 Inquadramento dell'area di studio 22

2.2 Quadro normativo di riferimento: il P.A.I. 30

2.2.1 Il decreto crolli 35

2.3 Inventario dei crolli nell'area di Monte Pellegrino 38

Capitolo 3 Analisi preliminari e confronto di metodi empirici 40

3.1 Analisi preliminari secondo il Decreto Crolli 40

3.2 Metodo per la stima dell'angolo di energia $\boldsymbol{\varphi p}$ (Castelli et. al. 2021) 44

3.3 Analisi preliminari con il metodo di Castelli et. al. 2021 47

3.3.1 Volume di progetto 0,5 m^3 51

3.3.2 Volume di progetto 2,5 m^3 54

3.3.3 Volume di progetto 5 m^3 57

3.4 Considerazioni sui risultati 60

Capitolo 4 Valutazione della pericolosità con il plug-in QProto 62

4.1 Identificazione delle aree sorgente 62

4.2 Volumi di progetto e propensione al distacco 66

4.2.1 Versante Sud-Est 68

4.2.2 Versante Nord-Est 69

4.2.3 Versante Nord 70

4.2.4 Versante Ovest 71

4.2.5 Caratterizzazione dell'area 73

4.3 Analisi di pericolosità secondo il decreto crolli 75

4.4 Analisi di pericolosità secondo il metodo di Castelli et.al. 2021 78

4.5 Considerazioni sui risultati 86

Capitolo 5 Analisi di rischio da caduta massi 88

5.1 Concetto di rischio 88

5.2 Definizioni e terminologia 89

5.3 Valutazione del rischio 92

5.3.1 Identificazione del pericolo e definizione degli scenari 92

5.3.2 Analisi di pericolosità 93

5.3.3 Elementi esposti 94

5.3.4 Valutazione della vulnerabilità 95

5.3.5 Valutazione del rischio 96

5.4 Il metodo IMIRILAND 101

5.5 Applicazione del metodo al caso studio 104

5.5.1 Rischio fisico 105

5.5.2 Rischio sociale 109

5.5.3 Rischio specifico 112

Conclusioni 116

Bibliografia 120

Sitografia 124

Introduzione

Il fenomeno della caduta massi rappresenta un pericolo particolarmente gravoso a causa dell'elevata velocità ed imprevedibilità che lo caratterizzano e della sua diffusione in ambienti differenti (montani, zone collinari, falesie costiere). Risulta pertanto fondamentale analizzarne l'entità, l'evoluzione spaziale ed i possibili effetti sugli elementi a rischio, al fine di individuare eventuali misure di mitigazione che si rendano necessarie per la salvaguardia delle persone e del patrimonio pubblico e privato.

Sono disponibili in letteratura differenti metodi per l'analisi della propagazione dei blocchi lungo il pendio, che si differenziano anche in base alla scala di osservazione. È possibile distinguere i metodi semplificati, quali ad esempio il metodo dei coni o dell'EAM (*energy angle method*) proposto da Jaboyedoff e Labiouse nel 2011, che permette di definire in prima approssimazione le aree di invasione e la velocità dei blocchi instabilizzatisi e le analisi numeriche di tipo probabilistico fisicamente basate, applicabili in quegli ambiti in cui è disponibile un elevato numero di informazioni. Le analisi semplificate possono essere utilizzate quando si intende analizzare aree vaste al fine di individuare le aree critiche in cui si rendono necessarie delle analisi di maggior dettaglio.

L'elaborato riporta uno studio volto ad affrontare le problematiche relative al fenomeno di crollo in roccia che affligge l'area della città di Palermo, con in particolare riferimento alle porzioni di territorio alla base dei versanti di Monte Pellegrino. L'area di studio è stata indagata mediante un'analisi qualitativa in sito delle caratteristiche geomorfologiche dei versanti di interesse, per poi procedere all'analisi di pericolosità e rischio. La propagazione dei crolli è stata analizzata con il metodo speditivo dei coni ed il rischio valutato con procedura IMIRILAND.

Per l'applicazione del metodo dei coni si è utilizzato il *plug-in* QProto, implementato in ambiente GIS (*software Open-Source* Qgis), inizialmente ideato per l'analisi della propagazione dei crolli in area alpina. Tramite questo studio è stato possibile verificare l'efficacia del metodo anche in ambito di pareti sub-verticali in ambiente costiero.

QProto utilizza l'EAM (energy angle method) proposto da Jaboyedoff e Labiouse nel 2011 effettuando un'analisi tridimensionale sulla base di un DTM di riferimento, in

questo caso quello fornito dalla Regione Sicilia con risoluzione 2m, generando per ogni punto sorgente un cono di visibilità.

Al fine di definire i parametri necessari per l'utilizzo del *plug-in* QProto è stato fatto riferimento ad alcune indicazioni fornite da Castelli et. al. nel 2021 circa l'influenza delle caratteristiche dei blocchi e dei versanti sulla propagazione dei massi. I risultati ottenuti dalle analisi sono quindi stati confrontati con quelli ottenuti da altri autori con metodi differenti e con le direttive del PAI della Regione Sicilia.

La valutazione del rischio è stata condotta secondo il metodo IMIRILAND (*Impact of Large Landslide in the Mountain Environment*) sviluppato per le analisi di rischio per grandi frane in ambiente alpino ma applicabile anche ai fenomeni di caduta massi, verificando quindi la possibilità di estendere la metodologia ad ambienti differenti. Non si è considerata la probabilità temporale di accadimento degli eventi a causa dell'impossibilità di avere a disposizione informazioni e dati che consentissero di associare una probabilità di occorrenza alle volumetrie censite. Il rischio valutato è dunque indipendente dalla probabilità temporale.

I risultati delle analisi di propagazione ottenuti mediante QProto sono dunque stati utilizzati come *input* per la valutazione della vulnerabilità V degli edifici mentre le altre componenti del rischio (valore ed esposizione) sono state valutate sulla base di indicazioni di letteratura e delle indicazioni fornite dalla Prof.ssa Cappadonia.

In accordo con quanto previsto dal metodo IMIRILAND, si sono considerate due componenti di rischio: una fisica, relativa agli edifici e alla viabilità e una sociale, relativa alle persone. Infine, il rischio specifico totale è stato confrontato con le mappe fornite dal PAI.

Capitolo 1

Crolli in roccia

1.1 Fenomeni franosi in Italia

L'Italia è un paese ad elevato rischio idrogeologico e le frane, estremamente diffuse sul territorio nazionale, rappresentano uno degli eventi che si manifestano con maggior frequenza, causando ingenti perdite economiche e di vite umane.

Per poter catalogare gli eventi è stato creato il progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), realizzato dall'ISPRA e dalle Regioni e Province autonome. L'inventario fornisce un quadro dettagliato della distribuzione dei fenomeni franosi sul suolo italiano e ad oggi ha censito più di 600.000 eventi che interessano un'area di circa 23.700 km^2, pari al 7,9% del territorio nazionale. In particolare, le frane ad evoluzione rapida, quali ad esempio crolli e colate di detrito, sono particolarmente pericolose proprio a causa della velocità del fenomeno.

Dal dopoguerra ad oggi si è poi assistito ad un aumento del rischio per frana a causa della crescente antropizzazione del territorio, spesso in aree instabili.

I dati sono aggiornati al 2017 per la Regione Umbria; al 2016 per le regioni: Emilia Romagna, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Piemonte, Sicilia, Valle d'Aosta e per la provincia autonoma di Bolzano; al 2015 per la Toscana; al 2014 per la Basilicata e la Lombardia. Per le restanti regioni i dati sono aggiornati al 2007.

Tuttavia, essendo un progetto a scala nazione, non consente di raggiungere un livello di dettaglio elevato, pur rappresentando un valido supporto. La consultazione di archivi locali, se disponibili, ma anche di notizie di cronaca è di fondamentale importanza al fine di acquisire ulteriori informazioni necessarie per un'adeguata analisi dei fenomeni di instabilità

1.2 Aspetti generali

Una frana può definirsi come il movimento di una massa di roccia, terra o detrito lungo un versante (Cruden, David. 1991).

Le cause che predispongono e determinano questi processi sono molteplici e spesso combinate tra loro (Dipartimento Protezione Civile). È possibile identificare tra di esse cicli di carico e scarico, variazioni del livello idrico della falda a seguito di piogge o processi di fusione nivale con conseguente aumento delle pressioni interstiziali e riduzione della resistenza del materiale, carichi esterni, azioni sismiche, vegetazione, modifiche della geometria del versante, alterazioni della qualità del materiale a causa di fenomeni di erosione. Non bisogna poi sottovalutare l'azione dell'uomo, spesso senza criterio e rispetto dell'ambiente.

Lo studio di tali fenomeni risulta particolarmente complesso a causa delle numerose variabili in gioco, le differenti tipologie di materiali coinvolti e un ampio spettro di velocità di propagazione.

La loro classificazione può in genere essere fatta sulla base della tipologia di cinematismo, di materiale o al variare della velocità o dei volumi coinvolti.

Tra le classificazioni presenti in letteratura, una delle più utilizzate è quella di Varnes (1978) che tiene in considerazione la tipologia di movimento e di materiale. Sebbene siano disponibili in letteratura numerosi metodi, piò o meno accademici, quella di Varnes (tabella 1.1) permette di identificare il fenomeno, e quindi il corretto approccio il suo studio, tramite poche informazioni facilmente reperibili durante un'osservazione in sito.

Tabella 1.1: classificazione dei fenomeni franosi secondo Varnes (1978)

TYPE OF MOVEMENT		TYPE OF MATERIAL		
		BEDROCK	ENGINEERING SOILS	
			Predominatly coarse	Predominatly fine
FALLS		Rock falls	Debris fall	Earth fall
TOPPLES		Rock topple	Debris topple	Earth topple
SLIDES	ROTATIONAL	Rock slide	Debris slide	Earth slide
	TRANSLATIONAL			
LATERAL SPREADS		Rock spread	Debris spread	Earth spread
FLOWS		Rock flow (deep creep)	Debris flow (deep creep)	Earth flow (deep creep)
COMPLEX		Combination of two more principal types of movement		

1.3 Il fenomeno della caduta massi

In letteratura vengono riportate differenti definizioni del fenomeno di crollo in roccia.

Secondo McCauley et al. 1985, la caduta massi è il movimento di roccia, di qualsiasi dimensione, su un pendio sufficientemente inclinato affinché avvenga la propagazione. Tale movimento può includere una qualsiasi combinazione di caduta libera, rimbalzo, rotolamento e scivolamento. McCauley et al. hanno evidenziato come il fenomeno possa riguardare anche più di un blocco escludendo però le valanghe di roccia o crolli di grandi dimensioni.

Hungr et. al (2014) hanno definito invece la caduta massi come il distacco, la caduta, il rotolamento ed il rimbalzo di frammenti di roccia. Può avvenire per singoli blocchi o in cluster, ma si ha in generale un'interazione trascurabile tra di essi. La deformazione non è importante, sebbene i blocchi possano frammentarsi nell'impatto con il versante.

Secondo Pierson (1990) la caduta massi è un movimento, da molto rapido ad estremamente rapido, in cui parte del bedrock si distacca da un versante con pendenze elevate e discende tramite cadute, rimbalzi o rotolamenti.

Il volume varia prevalentemente tra 0.02 m^3 e 10 m^3, si distacca da pareti in roccia con inclinazioni particolarmente elevate, con velocità che possono raggiungere anche i 40 m/s (Barbero, 2022). Più rari sono invece gli eventi di crollo con volumi maggiori ma sono riportati in letteratura episodi con volumi fino a 10000 m^3, al limite comunque delle frane da crollo.

Il fenomeno del crollo in roccia è profondamente influenzato dalla struttura dell'ammasso roccioso. In particolare, le discontinuità presenti (fratture, piani di stratificazione, faglie, piani di foliazione ecc.…) intersecandosi isolano dei blocchi di dimensioni variabili con propensione al distacco funzione della resistenza lungo i piani delle discontinuità stesse.

Esse rappresentano quindi gli elementi primari che influenzano la stabilità di una parete rocciosa e la loro orientazione influenza le dimensioni, la forma del blocco e la tipologia di distacco.

I più comuni meccanismi di rottura sono:

- scivolamento lungo un piano;
- scivolamento di un cuneo lungo l'intersezione di due piani di debolezza;
- ribaltamento;
- scivolamenti lungo superfici curve;

Le cause scatenanti possono risultare da una combinazione di fattori esterni ed interni. I fattori interni sono relativi alle caratteristiche intrinseche dell'ammasso roccioso quali la litologia, la resistenza al taglio delle discontinuità. Le cause esterne possono invece variare in base al caso studio e includono piogge, fusione nivale, sifonamenti, erosione, cicli gelo-disgelo o elevate temperature, azioni dinamiche quali terremoti o vibrazioni indotte dal moto ondoso se si è in aree costiere, azioni delle radici, cicli di carico e scarico che possono portare a stanchezza del materiale. Non bisogna poi trascurare l'azione dell'uomo il quale può indurre al crollo tramite vibrazioni, carichi aggiuntivi, scavi.

1.3.1 Dinamica del fenomeno

La dinamica del fenomeno è influenzata da diversi fattori quali le dimensioni, la forma, il materiale di cui è costituito il blocco, la tipologia di copertura del versante (se presente), la velocità iniziale e la presenza di vegetazione.

Per poter studiare in modo corretto ed esaustivo il fenomeno occorre analizzare le differenti fasi del moto:

1. distacco del blocco, caratterizzando l'area sorgente, la forma, le dimensioni e la velocità iniziale;
2. moto del blocco in aria;
3. impatto del blocco sul versante, tenendo conto del punto di contatto e quantificando le perdite di energia, la velocità del blocco a seguito dell'urto e le altezze di rimbalzo;
4. movimento lungo il pendio;
5. arresto.

1) In questa prima fase si verifica la possibilità cinematica di distacco dei blocchi di interesse. Si tratta quindi di una fase preliminare in cui è necessario ottenere delle informazioni, ricavabili da analisi strutturali e/o rilievi storici, relative alle principali famiglie di discontinuità dell'ammasso roccioso. L'obbiettivo è quello di definire l'orientazione delle fratture, reciproche e rispetto al fronte del versante, specificando inoltre la densità delle stesse al fine di avere un ordine di grandezza delle dimensioni dei possibili blocchi instabili.

I meccanismi di distacco più comuni risultano essere tipicamente (figura 1.1):

- scivolamento lungo un piano;
- scivolamento di un cuneo;
- ribaltamento.

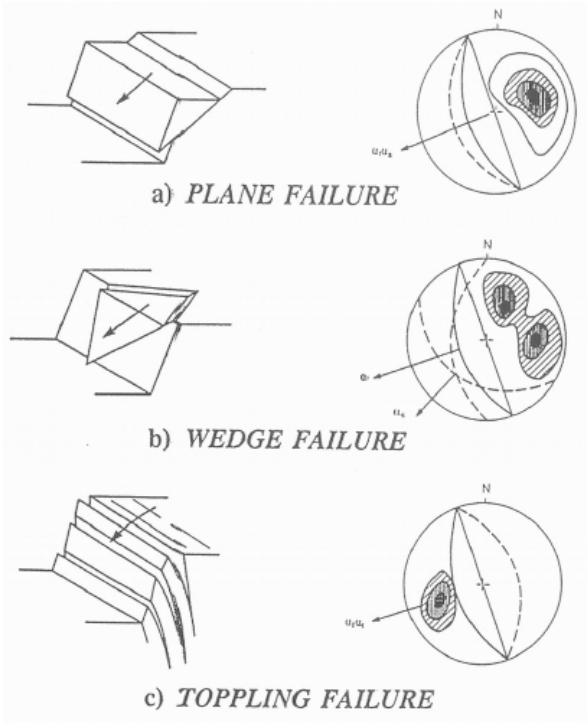

Figura 1.1- Meccanismi di rottura più frequenti (Barbero,2022).

Essendo il fenomeno di caduta massi affetto da incertezze intrinseche, questa fase di studio, così come le successive, va condotta utilizzando degli approcci probabilistici considerando differenti scenari di evento; è poi possibile distinguere sorgenti puntuali, lineari ed areali.

Per l'individuazione delle possibili aree di distacco si può fare riferimento a:

- eventi passati;
- osservazione del fronte del versante per poter definire le aree con pendenze maggiori e le nicchie di distacco.

2) Durante il moto in aria il cinematismo può essere di due tipi:

1. a gittata;
2. a caduta libera.

Nel caso di moto *"a gittata"* la velocità iniziale del blocco risulta essere non nulla. La definizione della velocità iniziale è affetta da incertezze epistemiche dovute alla carenza di informazioni. Generalmente se il blocco è mobilizzato da forze statiche o dinamiche esterne (quali terremoti o pressioni idrauliche) si può assumere un valore non nullo della componente orizzontale della velocità. In ogni caso la velocità iniziale è uno dei parametri cui è associata l'incertezza maggiore.

Durante il moto in aria il blocco segue una traiettoria parabolica e le componenti di velocità sono entrambe diverse da 0. Considerando semplificatamene una condizione bidimensionale, date le coordinate iniziali del punto (x_0, y_0) e la velocità iniziale (v_{0x}, v_{0y}) è possibile definire le coordinate al generico istante t:

$$\begin{Bmatrix} x = v_{0x} \cdot t + x_0 \\ y = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_{0y} \cdot t + y_0 \end{Bmatrix} \qquad (1.1)$$

essendo g l'accelerazione di gravità.

Le coordinate del punto di impatto vengono definite dall'intersezione della parabola con il profilo topografico ottenendo:

$$\begin{Bmatrix} y = -\frac{1}{2} g \cdot \frac{(x-x_0)^2}{v_{0x}^2} + v_{0y} \cdot \frac{x-x_0}{v_{0x}} + y_0 \\ \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \end{Bmatrix} \qquad (1.2)$$

Lo schema del moto in aria è quindi (figura 1.2):

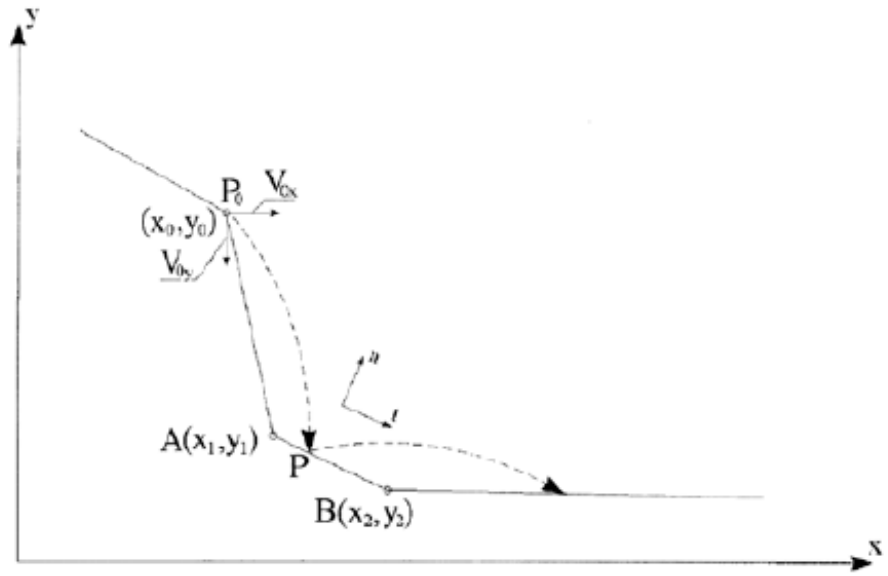

Figura 1.2 - Traiettoria del blocco (Giani 1997).

Nel caso di *"caduta libera"*, invece, la componente orizzontale della velocità è nulla e si risente esclusivamente dell'effetto della forza di gravità. Le equazioni da utilizzare sono le medesime del moto a *"gittata"* imponendo però la componente $v_{0h}=0$. Tipicamente si trascura la forza resistente derivante dall'attrito blocco/aria.

3) L'interazione blocco-pendio è influenzata da numerosi fattori quali ad esempio la geometria e la topografia del pendio, la tipologia e le caratteristiche dei materiali di copertura, presenza di vegetazione e di eventuali opere di protezione. Il comportamento di un blocco a seguito di un impatto può essere di diverso tipo: a parte il caso più semplice in cui l'urto determina l'arresto del masso, i moti che in generale possono instaurarsi sono quelli di rimbalzo, rotolamento o scivolamento. Nella caduta massi i fenomeni di puro rotolamento e di solo scivolamento sono meramente teorici. Nella realtà i blocchi, infatti,

non possono essere schematizzati con una definita forma geometrica, né la superficie del pendio può essere considerata piana. (Giani 1997).

È possibile in prima istanza ricercare, come proposto da Ritchie nel 1963 e riportato da Bar. et. al. nel 2016, una correlazione tra l'inclinazione del pendio e la tipologia di movimento (figura 1.3).

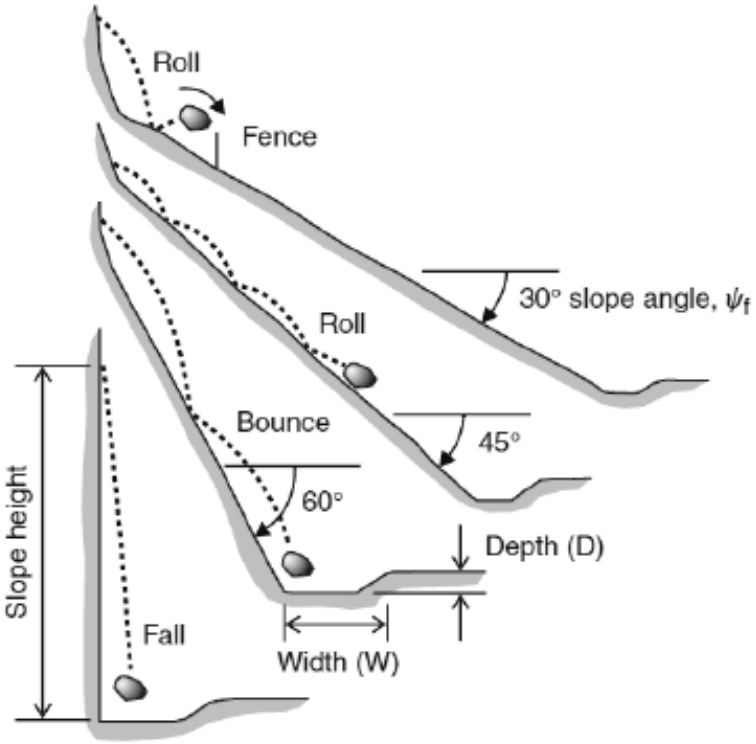

Figura 1.3 - Tipologia di moto in funzione dell'inclinazione del versante (Bar et. al. 2016).

4) Inoltre, anche la dimensione del blocco influenza il tipo di movimento che può succedere all'impatto; per esempio, in caso di copertura costituita da coltre detritica, se la dimensione del blocco è maggiore rispetto a quella del detrito si ha una dissipazione maggiore e una tendenza al rotolamento, mentre se la dimensione è minore si ha una tendenza al rimbalzo.

Come detto, anche la forma del blocco ha un ruolo importante: per massi con piani di scistosità si ha una propensione alla rottura, mentre per blocchi caratterizzati da forme arrotondate è più probabile il rotolamento. Indipendentemente dalla loro geometria, i blocchi con rigidezze basse tendono alla frammentazione.

Lo scivolamento è governato maggiormente dall'attrito dinamico e dall'inclinazione del pendio e uno dei metodi proposti per la sua descrizione è quello dello *sliding rock block model* (Pariseau e Voight 1979) secondo cui l'accelerazione del blocco che scivola lungo il pendio è definibile come:

$$a = g(sin\beta - cos\beta \cdot tan\delta) \qquad (1.3)$$

con β angolo di inclinazione del pendio e δ angolo di attrito dinamico allo scivolamento.

Il rotolamento è invece il moto in genere preponderante. Il blocco incrementa la propria velocità angolare e simultaneamente si riduce la velocità traslazionale. È possibile anche combinare le due tipologie di moto definendo così la *"rototraslazione"*.

Se invece l'energia del blocco è sufficiente, a seguito dell'impatto si può avere un rimbalzo. Durante questa fase le componenti di velocità, normale e tangenziale, cambiano in funzione della topografia e del materiale di copertura del pendio. Per poter studiare in modo accurato il fenomeno sarebbe necessario analizzare nel dettaglio numerosi aspetti, relativi alle leggi costitutive del blocco e del materiale presente lungo il versante, all'influenza della vegetazione e della stagionalità, alla tipologia di urto (elastico o anelastico), che porterebbero ad un'elevata incertezza dei risultati. A fronte di ciò, per descrivere la dinamica d'impatto vengono utilizzati i *coefficienti di restituzione*: tali coefficienti descrivono la variazione delle componenti di velocità del blocco impattante

a seguito dell'interazione con il pendio e sono definiti come il rapporto tra la velocità del masso dopo e prima l'impatto.

In letteratura sono disponibili alcune indicazioni per la loro stima in base alle caratteristiche del materiale di copertura; in ogni caso una *back analysis* sulla base di eventi passati si rende necessaria al fine di validare il modello.

Si può quindi concludere che il fenomeno di caduta massi risulta essere estremamente complesso, con numerose incertezze relative alla definizione dei parametri caratteristici e alla variabilità delle proprietà non solo da sito a sito, ma anche all'interno del singolo caso studio. Risulta quindi di fondamentale importanza, essendo dei fenomeni cui è associato un elevato rischio per la popolazione, definire le variabili nel modo più accurato possibile al fine di poter definire un modello geomeccanico in grado di prevedere scenari futuri.

1.4 Analisi di propagazione dei massi con metodi semplificati

L'analisi di propagazione della caduta massi è una delle principali fasi della valutazione della pericolosità. Sono disponibili numerosi metodi di analisi, sulla base delle informazioni disponibili e della scala dello studio, da metodi semplificati fino a modelli di dettaglio che permettono di ottenere le informazioni necessarie alla progettazione di interventi di difesa.

I metodi semplificati sono spesso basati su dati di letteratura, sull'analisi delle condizioni del versante in cui avviene la propagazione o su considerazioni di tipo empirico. Tipicamente questi approcci vengono utilizzati in studi preliminari, a scala regionale o in generale nei casi in cui non sono disponibili dati sufficienti per realizzare una

modellazione di dettaglio. Tali metodologie devono quindi essere facilmente applicabili, garantendo però l'affidabilità dei risultati ottenuti e possono essere in genere applicate tramite l'utilizzo di software GIS.

Tra i numerosi approcci disponibili in letteratura uno dei più utilizzati è il metodo dell'angolo di energia o EAM (*energy angle method*), sviluppato inizialmente da Onofri e Candian (1979) sulla base dell'approccio Fahrbosung proposto da Heim (1932).

L'EAM permette di rappresentare il fenomeno di caduta massi come uno scivolamento di un blocco lungo un piano ipotetico congiungente il punto di distacco con il punto di arresto, racchiudendo al suo interno le informazioni relative alle perdite di energia durante il moto dovute all'attrito che si sviluppa all'interfaccia blocco-pendio (Jaboyedoff e Labiouse 2011). L'angolo che si genera tra tale linea e il piano orizzontale viene definito come *"energy angle"*. Nel caso in cui si considerasse invece la congiungente tra la base della parete dalla quale si ha il distacco e il punto di arresto, l'angolo tra la retta e l'orizzontale verrebbe definito come *"shadow angle"* (Evans et. al. 1993). L'applicazione dell'EAM è diffusa in numerosi *software* quali ad esempio CONEFALL (Jaboyedoff 2003). In figura 1.4 si riporta la definizione dell'*energy line*.

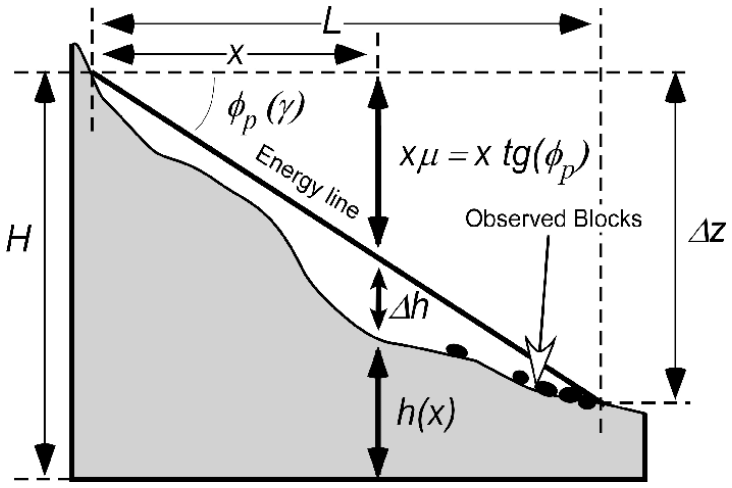

Figura 1.4 - Definizione dell'angolo di energia φ_p (Labiouse 2011).

Per l'applicazione del *software* CONEFALL si rendono necessari un DTM e un file relativo alle zone di distacco dei blocchi. L'analisi avviene tramite la creazione di un cono per ogni punto sorgente e l'intersezione di tali coni con la superficie topografica rappresenta le possibili aree di invasione. Questa variazione tridimensionale, nella quale viene specificata l'apertura del cono, viene chiama anche *"metodo dei coni"* (CM) e rappresenta la base del funzionamento del *plugin* QProto, utilizzato nel presente elaborato di tesi.

Tramite un bilancio energetico è inoltre possibile stimare in prima approssimazione la velocità in punti differenti e di conseguenza l'energia cinetica del blocco. La stima viene effettuata applicando la seguente relazione:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} = \sqrt{2 \cdot g \cdot (H - h(x) - x \cdot \tan\varphi_p)} \qquad (1.4)$$

Con:

v = velocità del blocco;

g = accelerazione di gravità;

H = quota del punto di distacco;

h(x) = quota del punto in posizione x;

φ_p = angolo di energia.

(Torsello 2019)

1.4.1 Il plug-in QProto

Come precedentemente accennato, il metodo dei coni viene anche implementato dal *plug-in* QProto del *software open-source* QGis, creato e supportato da Open Source Geostatica Foundation (OSGeo) (Castelli et. al. 2019) e utilizzato nell'ambito di tale elaborato al fine di definire aree potenzialmente suscettibili a fenomeni di crollo nell'area di Monte Pellegrino a Palermo.

Il *plug-in* è stato sviluppato in ambiente Python e utilizza la funzione *r.viewshed* disponibile in GRASS la quale permette di individuare le zone di visibilità a partire da dei punti di distacco (Castelli et. al. 2019). Considerando tali punti come possibili sorgenti di caduta massi è allora possibile assumere che le zone che ricadono all'interno dei coni di visibilità siano potenziali aree di invasione. Gli angoli fondamentali da definire per ogni cono sono tre:

1) inclinazione;
2) apertura;
3) orientazione.

QProto permette, oltre che la definizione delle aree di invasione, una prima stima della suscettibilità e della pericolosità spaziale da caduta massi. Nei casi in cui siano presenti più sorgenti, il *plug-in* permette infatti di realizzare delle analisi multiple, fornendo una mappa di frequenza delle celle viste dal maggior numero di sorgenti.

Sulla base della teoria del metodo dei coni è possibile inoltre effettuare una stima della velocità e di conseguenza dell'energia cinetica.

$$v(x,y) = \sqrt{2g[H(x_0,y_0) - h_p(x,y) - \tan(\varphi_p)\sqrt{(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}} \qquad (1.5)$$

in cui g è l'accelerazione di gravità, x_0 e y_0 le coordinate del punto di distacco S, $H(x_0,y_0)$ la quota del punto sorgente, $h_p(x,y)$ la quota del punto considerato e φ_p l'angolo dell'*energy line* con l'orizzontale.

Il concetto dell'EAM può essere esteso a uno studio tridimensionale, introducendo l'angolo di apertura del cono di visibilità (figura 1.5).

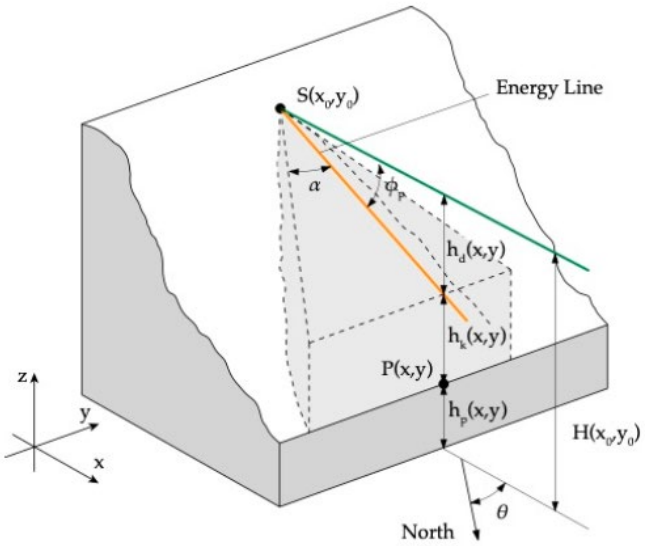

Figura 1.5 – Rappresentazione tridimensionale dell'energy angle method (EAM), metodo del cono di visibilità (Castelli et. al. 2021)

Bisogna inoltre considerare che il calcolo dell'energia cinetica non tiene conto della combinazione tra moto in aria, rimbalzi, rotolamenti e scivolamenti che si manifestano nella realtà. Tali fenomeni sono simulati tramite un moto di scivolamento equivalente sopra il piano congiungente il punto di distacco e il punto di arrivo, con inclinazione φ_p rispetto all'orizzontale; di conseguenza i valori di velocità ed energia ottenibili sono da utilizzare con cautela. Per poter tener conto delle diverse caratteristiche delle sorgenti è inoltre possibile applicare un parametro di propensione al distacco DI, variabile tra 0 ed 1 (Castelli et. al 2019).

Il parametro di propensione al distacco può essere stimato a partire da dati storici, definendo le aree da cui con più frequenza si sono originati dei distacchi, piuttosto che da analisi geomeccaniche/geomorfologiche in sito. DI permette quindi di realizzare delle mappe di frequenza e di pericolosità pesate sulla base delle caratteristiche dei punti sorgente.

I parametri di *input* del *plug-in* sono 7:

- ID: identificativo per ogni punto sorgente i-esimo;
- ELEVATION: valore della quota da DTM del punto sorgente i-esimo;
- ASPECT: direzione di immersione del punto sorgente i-esimo compreso tra 0° e 360°;
- PROPENSITY TO DETACHEMENT INDEX I_D: coefficiente che permette di assegnare ad ogni punto sorgente una propensione al distacco, variabile tra 0 e 1 al fine di realizzare le mappe di suscettibilità e di energia pesate;
- BOULDER MASS: campo in cui riportare la massa del blocco [kg] per la definizione delle energie cinetiche;
- ENERGY LINE ANGLE: valore dell'angolo rispetto all'orizzontale della linea di energia relativa all'i-esimo cono (0°-90°);
- LATERAL SPREADING ANGLE: angolo di apertura del cono;
- VISIBILITY DISTANCE: massima distanza dell'analisi [m].

Per l'utilizzo del *plug-in* è quindi necessario avere un DTM di riferimento per la definizione sia delle quote che degli angoli di esposizione rispetto al nord, ottenibili in ambiente GIS; le analisi di visibilità vengono infatti realizzate cella per cella.

I punti sorgente vengono invece definiti tramite *shapefile* ed è possibile effettuare delle analisi sia su linee che su aree.

Oltre a specificare per ogni voce i campi corrispondenti è necessario indicare:

- *Source points*: vettore dei punti di distacco;
- DTM: *raster* del modello digitale del terreno su cui effettuare le analisi;
- *Results*: cartella di salvataggio dei file di *output*. Non è infatti ad oggi possibile salvare dei file temporanei.

I *file* di *output* generati a valle dell'elaborazione sono 10, di cui 9 *raster* e uno *shapefile* rappresentante i punti di arrivo. Nello specifico:

- *count*: *raster* contenente il numero di sorgenti da cui la cella viene "vista";
- *susceptibility*: *raster* della frequenza di passaggio dei coni simulati su ogni cella dell'area di invasione pesato con DI;
- v_min: *raster* della velocità minima per ogni cella dell'area di invasione [m/s];
- v_mean: *raster* della velocità media per ogni cella dell'area di invasione [m/s];
- v_max: *raster* della velocità massima per ogni cella dell'area di invasione [m/s];
- e_min: *raster* dell'energia minima per ogni cella dell'area di invasione [J]:
- e_mean: *raster* dell'energia media per ogni cella dell'area di invasione [J];
- e_max: *raster* dell'energia massima per ogni cella dell'area di invasione [J];
- w_en: *raster* dell'energia massima pesata per ogni cella dell'area di invasione, definita come massimo dei prodotti peso x e_max;
- w_tot_en: *raster* dell'energia totale pesata per ogni cella dell'area di invasione, definita come sommatoria di tutti i prodotti peso x e_max.

I *raster* w_en e w_tot_en possono essere interpretati come mappe di pericolosità relativa poiché tengono conto sia dell'energia che delle caratteristiche della zona sorgente tramite il coefficiente di propensione al distacco.

Il parametro fondamentale per le analisi con QProto è quindi l'*energy angle*, all'interno del quale si riassumono tutte le caratteristiche della propagazione. Una non corretta stima del valore dell'angolo porta a un errore nella definizione sia delle aree di invasione che dei valori di energia.

In letteratura sono disponibili diversi valori che possono essere utilizzati nei casi in cui non si hanno indicazioni o dati di riferimento, tenendo comunque conto che la caduta massi è un fenomeno estremamente complesso, influenzato da parametri sito-specifici. Per esempio Onofri e Candian (1979), sulla base di osservazioni sito-specifiche hanno osservato che il 100% dei blocchi si arrestava per angoli $\varphi_p > 28.5°$; Lied (1977) osservò che la maggior parte dei blocchi si arresta per angoli $28° < \varphi_p < 30°$; Evans e Hungr (1993) definirono un angolo $\varphi_p = 27.5°$.

Sarebbe opportuno tener conto però sia delle caratteristiche delle aree di propagazione che delle proprietà del blocco, quale ad esempio la massa dello stesso.

In particolare, a livello regionale è presente in Sicilia una direttiva specifica, nell'ambito del PAI (piano di assetto idrogeologico), per una prima definizione dell'angolo di energia sulla base delle caratteristiche del pendio a valle della zona di distacco, cui si farà riferimento successivamente nella descrizione della metodologia utilizzata.

Limitarsi quindi all'applicazione del metodo senza un corretto studio delle aree di propagazione risulterebbe inefficace, portando a dei risultati non rappresentativi delle condizioni reali.

Capitolo 2

Caratteristiche dell'area di Monte Pellegrino e quadro normativo

2.1 Inquadramento dell'area di studio

L'obiettivo della presente tesi è valutare gli scenari di caduta massi nell'area di Monte Pellegrino nella città di Palermo, la quale conta al 2022 circa 630.000 abitanti. L'area di studio è ubicata nel settore costiero della Sicilia settentrionale e fa parte dei Monti di Palermo.

Nella zona di studio, si ritrova un'alternanza tra aree montuose a sud-ovest (Monti di Belmonte Mezzagno) e a sud-est (Pizzo Selva a Mare), aree collinari nella porzione centro-meridionale, le valli fluviali dei fiumi Eleuterio ed Oreto e aree costiere pianeggianti nella porzione settentrionale, interrotte dai tre rilievi carbonatici di Monte Gallo, Monte Pellegrino e a sud Monte Catalfano.

Negli ultimi 20 anni l'area di Monte Pellegrino è stata colpita da un elevato numero di fenomeni di crollo, più che nell'intera area urbanizzata del territorio di Palermo (Cafiso e Cappadonia 2019).

In figura 2.1 sono stati evidenziati gli edifici presenti e le porzioni di territorio definite come beni paesaggistici dal D.lgs. 42/04.

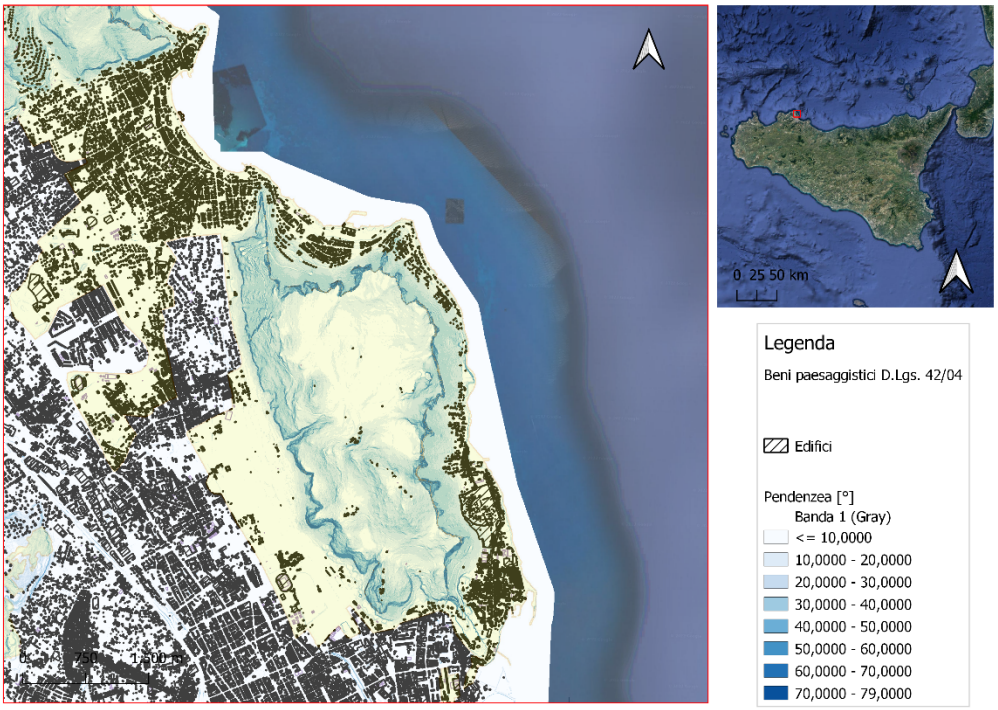

Figura 2.1 – Aree definite come bene paesaggistico secondo il D.lgs. 42/04.

La zona è di particolare interesse poiché si ha la presenza di un rilievo con propensione ad originare fenomeni di caduta massi e di un'estesa area urbana di importanza turistica, storica, paesaggistica e religioso culturale. Quella di Monte Pellegrino è infatti un'area di culto molto importante per la presenza del santuario di Santa Rosalia, protettrice della città di Palermo e meta di pellegrinaggio durante tutto l'anno. L'area territoriale in esame è inoltre dichiarata *Riserva Naturale Orientata di Monte Pellegrino* e *Sito di Interesse Internazionale*. (PAI Sicilia, bacino fiume Oreto).

Nel settore sud, alla base del rilievo, ha origine il percorso utilizzato dai pellegrini per raggiungere il santuario di Santa Rosalia, nella parte ovest sono presenti le strutture sportive della città mentre lungo il versante est si trova il cimitero monumentale di Santa Maria dei Rotoli (figura 2.2). Lungo la costa si ha inoltre un'importante via di

comunicazione -SS113- che collega Palermo a Mondello, nota ed affollata località turistica estiva.

Figura 2.2 – Foto aerea da drone del versante est sovrastante il Cimitero di Santa Maria dei Rotoli.

Da un punto di vista geomorfologico i Monti di Palermo sono per lo più di natura calcareo-dolomitica e presentano forme aspre e complicate, fortemente influenzate dall'azione tettonica e ulteriormente modellate delle acque superficiali, con valli profonde, strette e incassate. Sono frequenti i processi di dissoluzione chimica per carsismo che danno luogo alla formazione di doline e di grotte, anche di notevole ampiezza, spesso concentrate lungo i lineamenti tettonici. Gli stessi aspetti morfologici caratterizzano anche il massiccio carbonatico di Monte Pellegrino, che raccorda il golfo di Palermo e il golfo di Mondello e risulta separato dal complesso orografico dei Monti di Palermo dalla pianura quaternaria su cui si sviluppa la città. (PAI Sicilia, bacino fiume Oreto)

Monte Pellegrino è infatti un rilievo isolato la cui struttura si sviluppa per circa 6 km in direzione NNW-SSE, con un'altitudine massima di 594.4 m s.l.m. e con una forma piatta ed arrotondata. L'assetto morfologico è caratterizzato da versanti carbonatici subverticali con inclinazioni che superano in alcuni punti i 70°, mentre le parti sommitale e basale sono costituite da spianate e terrazzi. Esso ricade all'interno del foglio 595010 della Carta Tecnica Regionale (figura 2.3).

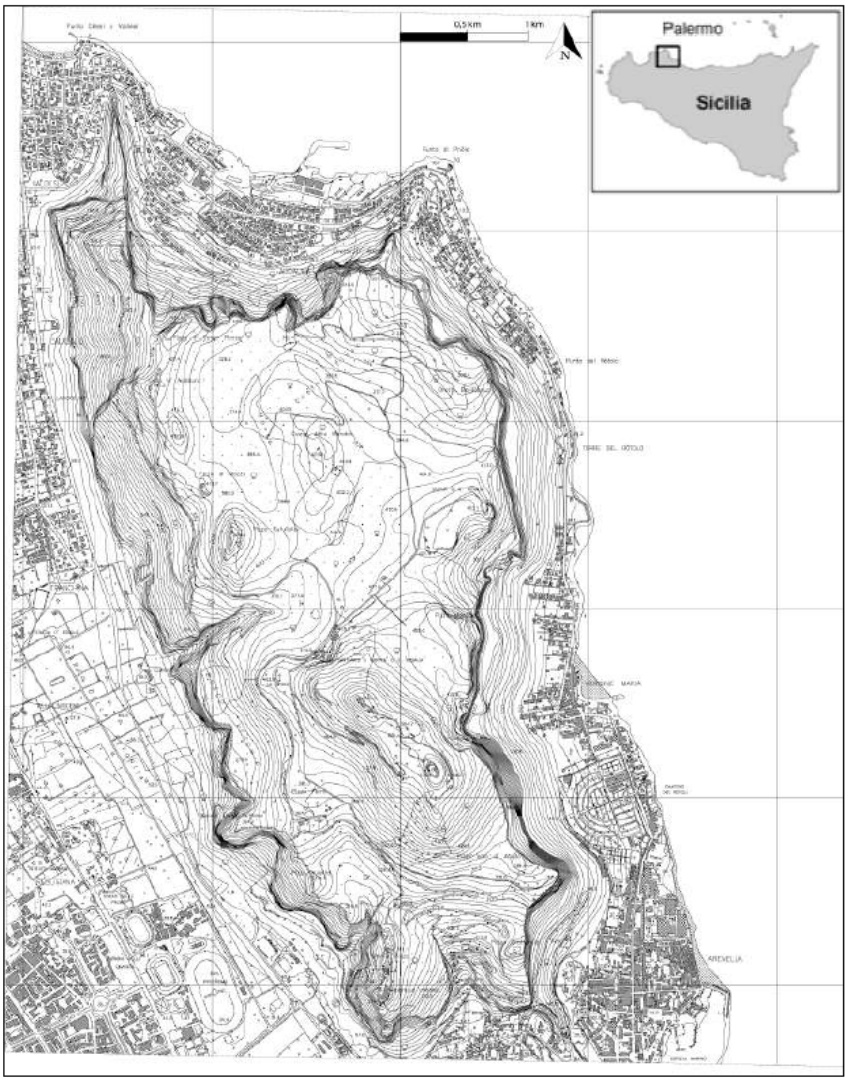

Figura 2.3 – Estratto della carta tecnica regionale (CTR) dell'area di Monte Pellegrino.

L’assetto attuale è il risultato della sezione tettonica dei depositi di piattaforma carbonatica del Dominio Panormide e della successiva dissezione ad opera di faglie normali correlate agli eventi di apertura del Mar Tirreno. Tali deformazioni hanno portato alla definizione di alti strutturali come il Monte Pellegrino e alla formazione della Piana di Palermo (Conca d’Oro) che è adagiata su una struttura di “semi-graben” (Cappadonia et. al.2020) e che si sviluppa verso mare secondo un cuneo di immersione a bassissima inclinazione formato da depositi marini di acque poco profonde, per lo più di natura carbonatica, del Quaternario l.s. potenti fino ad un centinaio di metri. La struttura risulta quindi molto complessa e le pareti alterate da fenomeni di weathering, carsismo, azione meccanica da parte delle radici delle piante e dalla presenza di pieghe e faglie. Tale assetto definisce gli ammassi rocciosi come un sistema mono-corpo con configurazione a blocchi di varie dimensioni che sono il risultato dei rapporti geometrici tra i diversi sistemi di discontinuità così generati e dei loro rapporti con il fronte di esposizione del versante. I blocchi così isolati conferiscono agli ammassi rocciosi livelli di suscettibilità ai fenomeni di crollo variabili a seconda delle locali condizioni di instabilità (Cappadonia et. al. 2021).

Per poter valutare in modo qualitativo le caratteristiche delle pareti, è stato effettuato un sopralluogo nel mese di luglio 2022, utile anche all’individuazione delle aree con alterazione maggiore, alle quali è possibile attribuire una propensione al distacco maggiore, a cui si farà riferimento nel capitolo 4 per la valutazione della pericolosità.

Nel corso del sopralluogo sono stati riscontrati numerosi massi potenzialmente instabili, isolati da sistemi di fratture parallele e perpendicolari al versante, derivanti da processi tettonici, pieghe e stratificazioni (figura 2.4).

Figura 2.4 – Foto aerea da drone delle principali famiglie di discontinuità.

Il rischio per gli edifici (figura 2.5) è comunque elevato nonostante la presenza di interventi di mitigazione del rischio attivi, quali chiodature dei blocchi di dimensioni maggiori, o passivi -barriere paramassi- i quali però risultano non correttamente manutenuti (figura 2.6).

Figura 2.5 – Foto aerea da drone delle abitazioni a ridosso dei versanti sub verticali lungo il versante est.

Come si nota in figura 2.5, nella parte basale, oltre ad una ricca coltre di detrito, sono presenti degli affioramenti quali evidenze morfologiche di processi gravitativi molto lenti che hanno coinvolto lo scorrimento verso valle di intere porzioni dell'ammasso. Questi processi hanno definito sui versanti una configurazione morfologica peculiare con la presenza di gradini e speroni a diversa resistenza meccanica che possono essere zone sorgente di ulteriori crolli e allo stesso tempo “trampolini” per i massi provenienti dalle pareti situate a quote maggiori, incrementandone l’energia e di conseguenza le possibili aree di invasione e la potenza distruttiva.

Figura 2.6 – Foto aerea da drone di interventi di difesa passivi (barriere paramassi) che non sono state manutenute.

Lungo la strada per raggiungere il santuario di Santa Rosalia son installate anche delle reti in aderenza, ad oggi in condizioni pessime, le quali non svolgono più alcuna funzione di mitigazione ed anzi, dato il loro stato, possono portare ad un aumento del rischio per un falso senso di sicurezza (figura 2.7).

Figura 2.7 – Reti in aderenza che non svolgono più alcuna funzione.

Anche la vegetazione alla base del rilievo è variata nel tempo, specialmente nel 2016 a seguito di un vasto incendio che ha interessato l'intera area di Monte Pellegrino. Prima di tale evento era infatti presente una vasta vegetazione tipica della macchia mediterranea, sostituita successivamente in gran parte da piante infestanti. La tipologia di vegetazione influenza fortemente il moto dei blocchi lungo il versante; in particolare, alberi ad alto fusto danno un effetto di mitigazione alla propagazione rallentando i massi durante la loro discesa riducendone l'energia cinetica per mezzo degli impatti con gli stessi fino in alcuni casi ad arrestarli completamente. A seguito degli eventi del 2016, con la scomparsa di vegetazione ad alto fusto, si ha un incremento del rischio.

2.2 Quadro normativo di riferimento: il P.A.I.

"Il Piano Stralcio per l'asserro Idrogeologico (P.A.I.), redatto ai sensi dell'articolo 17, comma 6 ter, della Legge 183/89, dell'articolo 1, comma 1, del D.L. 180/98, convertito con modificazioni dalla Legge 365/2000, ha valore di Piano Territoriale di settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni, gli interventi e le norme d'uso riguardanti la difesa dal rischio idrogeologico del territorio siciliano" (PAI Regione Sicilia).

Il P.A.I. rappresenta quindi il riferimento in ambito di dissesto e rischio idrogeologico, definendo le aree alle quali è associato un rischio maggiore e fornendo anche delle indicazioni sulle modalità di analisi dei diversi fenomeni, tra cui quelli di caduta massi.

La normativa in questo ambito, anche a livello nazionale, è comunque ampia e di supporto. L'articolo 154 del D.Lgs. 152/06 definisce ad esempio il dissesto idrogeologico come *"la condizione che caratterizza aree ove i processi naturali o antropici, relativi alla dinamica dei corpi idrici, del suolo o dei versanti, determinano condizioni di rischio sul territorio"*.

La definizione del rischio non è immediata e bisogna tener conto simultaneamente di più elementi. Il P.A.I. adotta la definizione classica del rischio, considerato come il prodotto di tre fattori fondamentali:

$R=H \times E \times V$ (1)

- H= pericolosità, relativa alla probabilità che l'evento calamitoso accada in una data area, con una certa intensità;
- E= il valore degli elementi esposti al pericolo (intesi come persone, immobili, patrimonio);

- V= vulnerabilità degli elementi, funzione della capacità di sopportare le sollecitazioni generate dall'evento calamitoso.

Il rischio idrogeologico viene quindi definito come *"valore atteso di perdita di vite umane, di danni al patrimonio culturale e/o ambientale e alla proprietà, all'interruzione di attività economiche e di perdita di beni ambientali e culturali, in conseguenza del verificarsi di frane, inondazione, fenomeni di erosione costiera e di inondazione marina delle aree costiere*". La valutazione può essere qualitativa o quantitativa, sulla base delle finalità dello studio e delle risorse a disposizione.

Oltre che di una relazione generale, il P.A.I. è costituito da relazioni descrittive di ogni bacino idrografico articolate in 5 parti:

1. Ambiente fisico;

2. Analisi del rischio geomorfologico;

3. Piani degli interventi per la mitigazione del rischio geomorfologico;

4. Analisi del rischio idraulico;

5. Piano degli interventi per la mitigazione del rischio idraulico.

Le relazioni sono inoltre integrate da carte a piccola scala che inquadrano la situazione del bacino di interesse. Costituiscono parte integrante del P.A.I le Cartografie Tecniche Regionali, in scala 1:10000, ove sono rappresentati i tematismi fondamentali del Piano:

- Dissesti;
- Pericolosità e Rischio Geomorfologico;
- Pericolosità idraulica per fenomeni di esondazione;
- Rischio idraulico.

Ad ogni frana è associato un codice identificativo. R19 identifica la Regione Sicilia, i primi numeri individuano il distretto idrografico, successivamente all'interno dello stesso distretto la I individua il bacino idrografico mentre la A l'area territoriale; segue una lettera che inquadra il versante e il numero successivo corrisponde alla provincia di appartenenza. Ad esempio, **R19 093I E 8 CR 011,** individua la frana n. 11 del Comune di Carlentini, prov. di Siracusa, che ricade all'interno del bacino idrografico dell'area del Fiume San Leonardo (Lentini), che sfocia nel versante orientale siciliano.

Le frane sono suddivise in frane puntuali, aventi accumuli di estensione inferiore ad un ettaro, frane poligonali i cui accumuli risultano avere estensione superiore ad un ettaro e aree soggette a frane diffuse di diversa tipologia. Viene inoltre definita la tipologia di cinematismo (crolli, scorrimenti, espansioni, colamenti lenti, colamenti rapidi, sprofondamenti, frane complesse, DGPV, aree soggette a crolli diffusi, aree soggette a sprofondamenti diffusi, aree soggette a frane superficiali diffuse) e lo stato di attività, differenziando tra attive, riattivate, sospese, quiescenti, stabilizzate, relitte (PAI Regione Sicilia).

Il P.A.I. fornisce una cartografia di riferimento per la pericolosità ed il rischio idrogeologico che verrà utilizzate nell'ambito di questa tesi come confronto e validazione dei risultati ottenuti. In particolare, per la valutazione della pericolosità da frana è necessario valutare:

- l'intensità o magnitudo, intesa come severità meccanica e geometrica del fenomeno;
- lo stato di attività, che fornisce una valutazione di tipo temporale e quindi della propensione.

Sulla base di queste valutazioni, vengono quindi individuate 5 classi di pericolosità, da P0 a P4, con intensità crescente (tabella 2.1):

Tabella 2.1 – Classi di pericolosità da PAI Regione Sicilia vigente.

P0	Pericolosità bassa
P1	Pericolosità moderata
P2	Pericolosità media
P3	Pericolosità elevata
P4	Pericolosità molto elevata

Sulla base della tipologia degli elementi esposti vengono inoltre definite 4 classe classi di rischio (tabella 2.2).

Tabella 2.2 – Classi di rischio da PAI Regione Sicilia vigente.

R1	RISCHIO MODERATO: per il quale i danni sociali, economico e al patrimonio ambientale sono marginali.
R2	RISCHIO MEDIO: per il quale sono possibili danni minori agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale che non pregiudicano l'incolumità del personale, l'agibilità degli edifici e la funzionalità delle attività economiche.
R3	RISCHIO ELEVATO: per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi, la interruzione di funzionalità delle attività socio-economiche e danni rilevanti al patrimonio ambientale.
R4	RISCHIO MOLTO ELEVATO: per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici, alle infrastrutture e al patrimonio ambientale, la distruzione di attività socio-economiche.

Si riportano nelle figure 2.8 e 2.9 le cartografie di riferimento del P.A.I. per l'area di Monte Pellegrino, relative ai dissesti mappati, in termini rispettivamente di pericolosità e di rischio (figura 2.8 e figura 2.9).

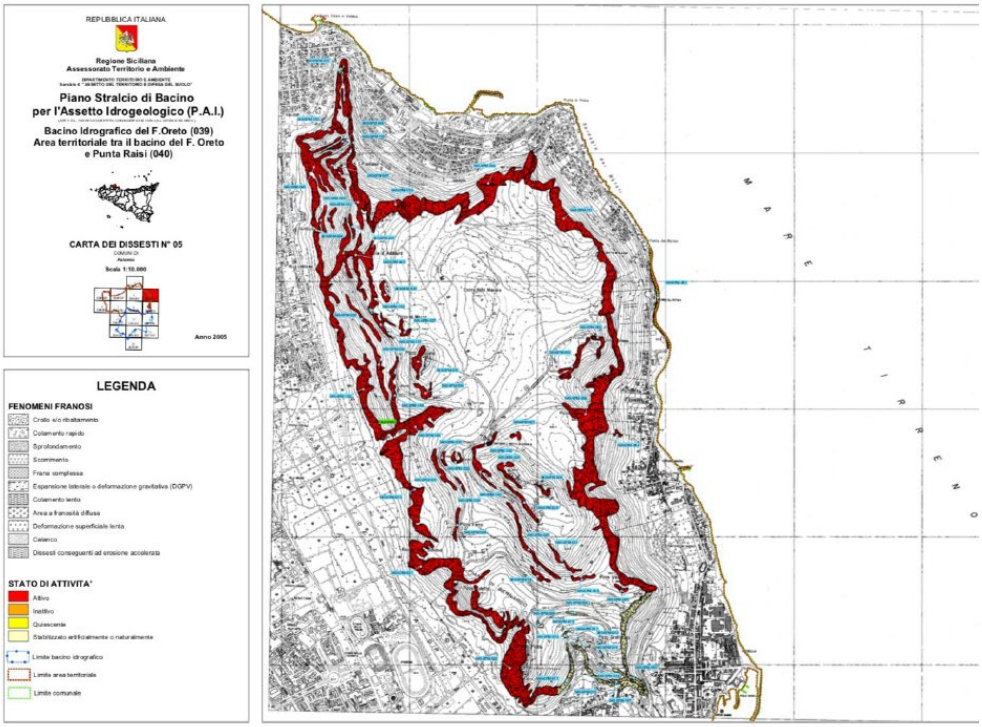

Figura 2.8 – Mappa di pericolosità geomorfologica per l'area di Monte Pellegrino riportata nel PAI Regione Sicilia.

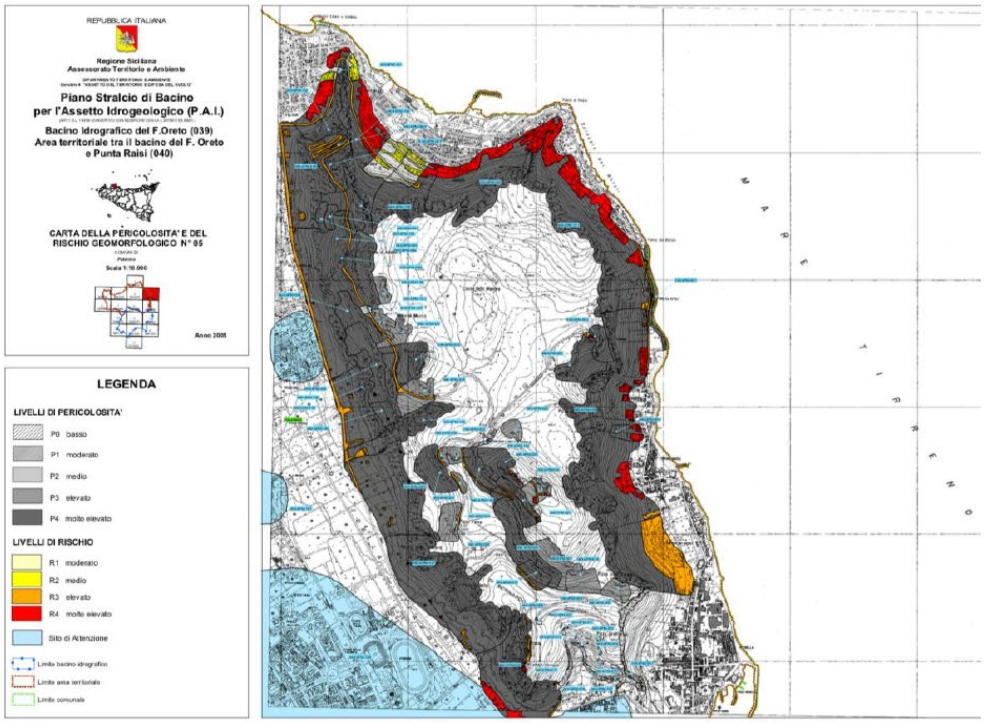

Figura 2.9 – Mappa di rischio geomorfologica per l'area di Monte Pellegrino riportata nel PAI Regione Sicilia.

2.2.1 Il decreto crolli

Con particolare riferimento al problema della caduta massi, con un aggiornamento del Capitolo 11- Norme di attuazione del 2021, all'Allegato 1 Appendice A vengono definite le *"DIRETTIVE PER LA REDAZIONE DEGLI STUDI DI VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITA' DERIVANTE DA FENOMENI DI CROLLI"*.

L'obiettivo di tale norma è di esplicitare e regolamentare i contenuti minimi degli studi geologici e geotecnici che supportano le richieste degli Enti Pubblici ed Uffici Territoriali per il parere di compatibilità geomorfologica e per gli elaborati propedeutici all'aggiornamento della pericolosità del P.A.I. limitatamente alle frane da crollo.

La procedura di analisi è stata rielaborata, rispetto alle indicazioni precedenti, mantenendo la struttura articolata in più fasi, con grado di approfondimento crescente. Ad un **primo livello di analisi preliminare (FASE 1)** che permette di valutare, in una prima approssimazione cautelativa, l'area di transito ed arresto dei massi in caduta per alcune tipologie e dimensioni delle frane di crollo, segue **una fase di scenario progettuale** (**FASE 2**) per la definizione delle energie che si possono sviluppare lungo gli scendimenti dei massi e una **terza fase di progetto (FASE 3)** per il dimensionamento degli interventi attivi e/o passivi (PAI Regione Sicilia)

Nell'ambito della presente tesi ci si limita a un livello di analisi preliminare (Fase 1) al fine di confrontare le aree di invasioni ottenute mediante l'applicazione di QProto con quelle fornite nella mappatura del P.A.I, data l'estensione dell'area di studio.

Prima di procedere con l'analisi è possibile effettuare una valutazione qualitativa preliminare delle condizioni dell'ammasso roccioso attraverso l'uso di classificazioni

riconosciute in ambito tecnico internazionale e/o la metodologia proposta dal Dipartimento.

Secondo quest'ultima metodologia, la classificazione viene realizzata attraverso la valutazione di 11 fattori ai quali sono assegnati 5 livelli di punteggio crescenti. La tabella allegata all'aggiornamento del P.A.I. 2021 viene riportata (tabella 2.3).

Tabella 2.3 – Definizione dei punteggi da assegnare sulla base delle caratteristiche dell'ammasso roccioso. (PAI 2021)

CATEGORIA		Indice di pericolo crescente ---------->				
I	Famiglie di giunti	pochissimi giunti	una famiglia di giunti	due famiglie di giunti	tre amiglie di giunti ammasso suddiviso in piccoli cubi	più di tre famiglie di giunti ammasso molto fratturato
	punteggio	*0*	*3*	*6*	*9*	*12*
II	Spaziatura giunti	> 200 cm. (molto larga)	da 60 a 200 cm. (larga)	da 60 a 20 cm. (moderata)	da 20 a 6 cm. (stretta)	< 6 cm. (molto stretta)
	punteggio	*3*	*6*	*9*	*12*	*15*
III	Direzione e pendenza discontinuità	molto favorevole	favorevole	discreta	sfavorevole	molto sfavorevole
	punteggio	*3*	*6*	*9*	*12*	*15*
IV	Apertura fessure Condizioni idrogeologiche	Fessure chiuse Circolazione idrica assente	Fessure chiuse o poco aperte Circolazione idrica nelle fessure scarsa	Fessure aperte da 1 mm a 1 cm Circolazione idrica nelle fessure sensibile e discontinua	Fessure aperte da 1 cm a 10 cm Circolazione idrica nelle fessure abbondante	Fessure aperte maggiori di 10 cm Circolazione idrica nelle fessure molto abbondante
	punteggio	*2*	*4*	*6*	*8*	*10*
V	Volume del masso	< 0,5 m^3	0,5 – 1,5 m^3	1,5 – 3 m^3	3 – 10 m^3	> 10 m^3
	punteggio	*3*	*6*	*9*	*12*	*15*
VI	Altezza scarpata	< 10 m	10 – 40 m	40 – 70 m	70 – 100 m	> 100 m
	punteggio	*2*	*4*	*6*	*8*	*10*
VII	Lunghezza pendio	> 250 m	250 – 100 m	100 – 50 m	50 – 10 m	< 10 m
	punteggio	*2*	*4*	*6*	*8*	*10*
VIII	Inclinazione media pendio	< 15°	15 – 30°	30 – 45°	45 – 70°	> 70°
	punteggio	*3*	*6*	*9*	*12*	*15*
IX	Andamento topografico (Rugosità del pendio)	terrazzato	a gradini	molto irregolare	irregolare	regolare, liscio
	punteggio	*0*	*3*	*6*	*9*	*12*
X	Tipo di materiale del pendio	sabbia, limo	ghiaia, ciottoli	presenza di blocchi dispersi	blocchi, roccia subaffiorante	roccia affiorante
	punteggio	*2*	*4*	*6*	*8*	*10*
XI	Frequenza storica di caduta dei massi – ultimi 30 anni	nessuno	pochi eventi	eventi occasionali	molti eventi	eventi ripetuti e frequenti
	punteggio	*1*	*4*	*6*	*8*	*10*

Sulla base del punteggio totale è possibile definire la classe dell'ammasso roccioso (tabella 2.4).

Tabella 2.4 – Classi di qualità dell'ammasso roccioso in funzione della classe di roccia (aggiornamento Capitolo 11-Norme di attuazione del 2021)

Punteggio totale	***≤ 50***	***51 - 70***	***71 - 90***	***91 - 110***	***> 110***
CLASSE DI ROCCIA	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**
QUALITA' DELL'AMMASSO ROCCIOSO	BUONA	MEDIA	MODESTA	SCADENTE	MOLTO SCADENTE

Secondo le linee guida, se dalle verifiche effettuate la classificazione dell'ammasso rientra tra le categorie D ed E e/o risulta evidente che il potenziale crollo può riguardare volumi superiori ai 1000 m^3, non è possibile eseguire una valutazione preliminare con il metodo empirico e si dovrà seguire con la Fase 2. In questo caso, considerate le caratteristiche delle pareti, la presenza di blocchi isolati e di volume limitato e studi di altri autori, con validi risultati, il metodo empirico risulta applicabile.

Un'indicazione molto importante dalla normativa, che sarà seguita anche successivamente per le analisi di propagazione, è relativa alla definizione delle aree sorgente. Oltre a quelle individuate con i rilievi, si devono considerare anche tutte le zone con pendenza superiore ai 40° derivate dal DEM con dettaglio pari o superiore al DEM 2x2 della Regione Siciliana. È inoltre necessario tener conto anche degli affioramenti rocciosi caratterizzati da asperità, anche con pendenze del versante inferiori a 40°.

Per la Fase 1, viene suggerito l'utilizzo del metodo dei coni. Per gli ambiti del territorio regionale, in funzione dei limiti del metodo e della necessità di realizzare delle analisi cautelative, viene individuato un angolo di inclinazione del cono di 27,5° da utilizzare in prima approssimazione a partire dal punto più alto della sorgente. Rimane possibile utilizzare altri valori in funzione di ragionamenti sulle condizioni locali.

Inoltre, nel caso in cui il versante sottostante la zona sorgente abbia inclinazioni inferiori a 27,5° oppure ripetuti cambi di pendenza con valori inferiori ai 27,5°, si può utilizare un angolo di 33°. Quando le pendenze del versante sottostante la scarpata rocciosa si presentano invece in media inferiori ai 10°, sarà possibile incrementare l'angolo del cono fino ad arrivare ad un massimo di 40°.

Nel caso di zona pianeggiante sottostante la parete il valore da utilizzare sarà di 45° o di 40° in caso di pendenze della parete rocciosa minori di 70° in ragione di probabili rimbalzi lungo il primo tratto di volo. (PAI Regione Sicilia, Capitolo 11-Norme di attuazione 2021)

2.3 Inventario dei crolli nell'area di Monte Pellegrino

Durante gli ultimi 20 anni sono stati numerosi i fenomeni di crollo censiti nell'area di Monte Pellegrino, che hanno spesso causato danni rilevanti specialmente alle vie di comunicazione; non è raro infatti osservare dei blocchi alla base dei fronti rocciosi.

Data la frequenza degli eventi e l'elevato valore esposto di una delle zone urbanizzate più importante del Sud Italia, sono stati realizzati da diversi autori numerosi studi di propagazione e di valutazione della pericolosità (Cafiso et.al. 2019, Cappadonia et. al. 2021), che verranno confrontati con i risultati del presente lavoro nel Capitolo 3.

L'ufficio di Protezione Civile del Comune di Palermo ha inoltre prodotto un inventario dei crolli, nel periodo 1998-2014 e in seguito aggiornato con l'inserimento dei dati degli anni successivi. In esso sono riportati la sorgente, il punto di arrivo, una stima semiquantitativa dei volumi coinvolti, che verranno utilizzati per la valutazione della pericolosità del Capitolo 4 e gli eventuali danni causti.

A testimonianza della pericolosità dell'area si riporta in figura 2.10 la presenza di alcuni blocchi stabilizzati con reti in aderenza in prossimità della strada SS 113.

Figura 2.10 – Interventi di stabilizzazione di blocchi mediante reti in aderenza lungo la SS 113.

Capitolo 3

Analisi preliminari e confronto di metodi empirici

3.1 Analisi preliminari secondo il Decreto Crolli

Come anticipato nel Capitolo 2, date le caratteristiche della zona di Monte Pellegrino, sono stati effettuati negli anni numerosi studi per la valutazione delle aree di invasione, applicando sia metodi empirici, incluso il metodo dei coni, che metodi fisicamente basati.

Per una prima analisi, al fine di poter avere una comparazione tra differenti approcci, sono state utilizzate come aree sorgente le linee di cresta corrispondenti alle porzioni sommitali delle pareti rocciose, (Cappadonia et. al. 2021) (figura 3.1).

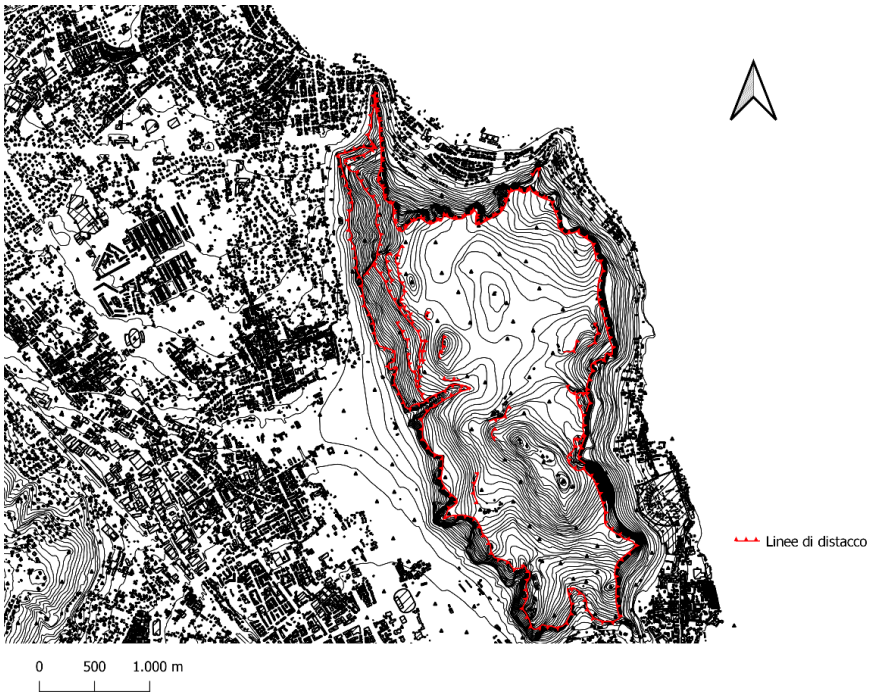

Figura 3.1 – Linee di distacco utilizzate per il primo scenario di simulazione (Cappadonia).

Le creste possono essere distinte sulla base della quota, infatti è una caratteristica del Monte Pellegrino la presenza di gradoni di grandi dimensioni, con creste definibili “alte” e creste “basse”.

Come primo scenario si è scelto di applicare i criteri indicati dal P.A.I. vigente, sulla base delle pendenze dei versanti sottostanti le linee sorgenti. Si riportano quindi le aree con pendenze inferiori ai 27,5° (limite inferiore) e le aree con pendenze maggiori di 27,5° ottenute utilizzando il DEM 2x2 della Regione Sicilia (figura 3.2 e figura 3.3).

Secondo il decreto crolli, tale differenziazione consente di definire in modo accurato i punti a cui attribuire un energy angle pari a 27,5° e i punti a cui assegnare invece 33°. L’angolo di apertura α è pari a 20° e la propensione al distacco è stata imposta pari ad 1 per ogni punto sorgente.

Come anticipato nella descrizione dei parametri di input di QProto, lungo le linee di cresta assunte come zone sorgente sono stati estratti degli shapefile puntuali, uno ogni 10 celle al fine di rendere più snella la simulazione, altrimenti troppo onerosa in termini computazionali. È stato osservato che, se il numero di punti è eccessivamente elevato, si riscontrano dei problemi nei file di output, i quali non vengono correttamente generati. Più nello specifico, a causa dell’elevato numero di dati da dover gestire (QProto genera una geometria puntuale per ogni cella all’interno del cono di invasione), si perde l’informazione di alcune sorgenti per le quali non viene effettuata l’analisi. Il numero di punti sorgente è stato ridotto da circa 7000 a 750 permettendo di effettuare la simulazione in circa 30 minuti.

In figura 3.4 sono riportati i risultati delle analisi in QProto.

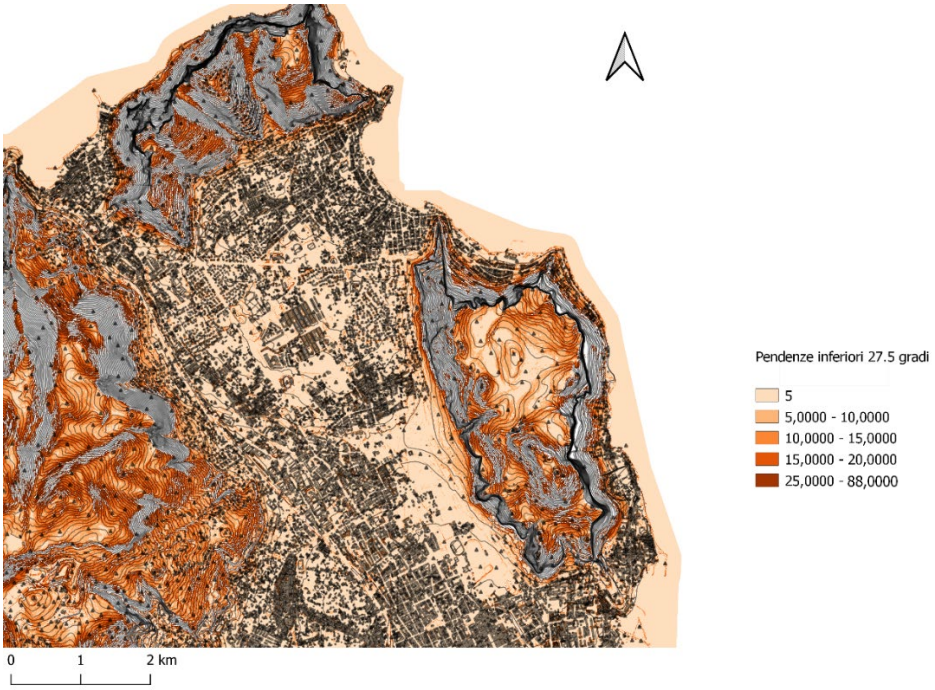

Figura 3.2 – Aree con pendenze inferiori a 27,5°.

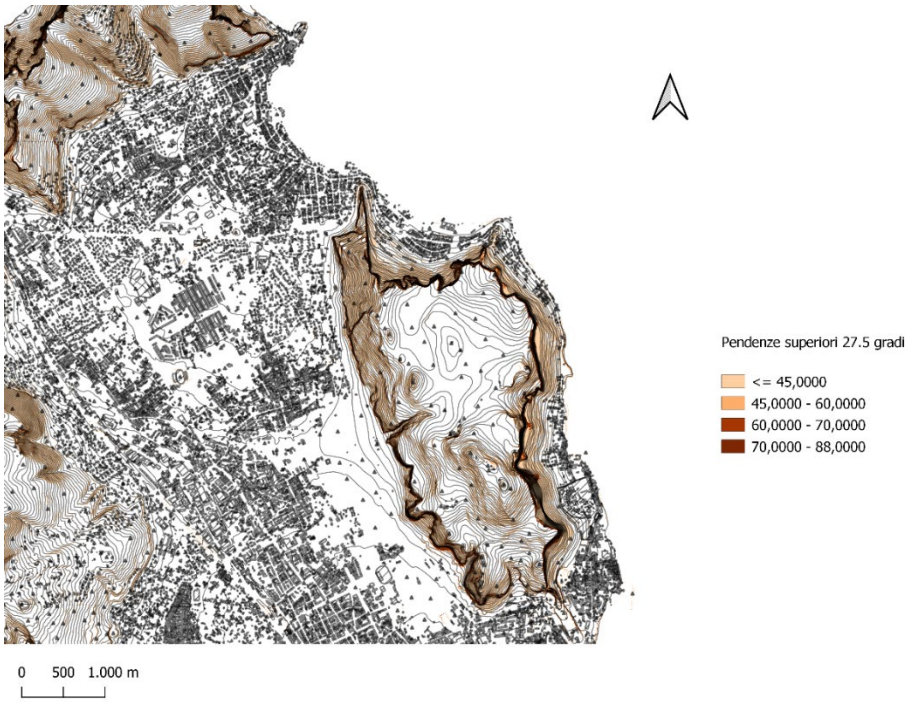

Figura 3.3 – Aree con pendenze superiori a 27,5°.

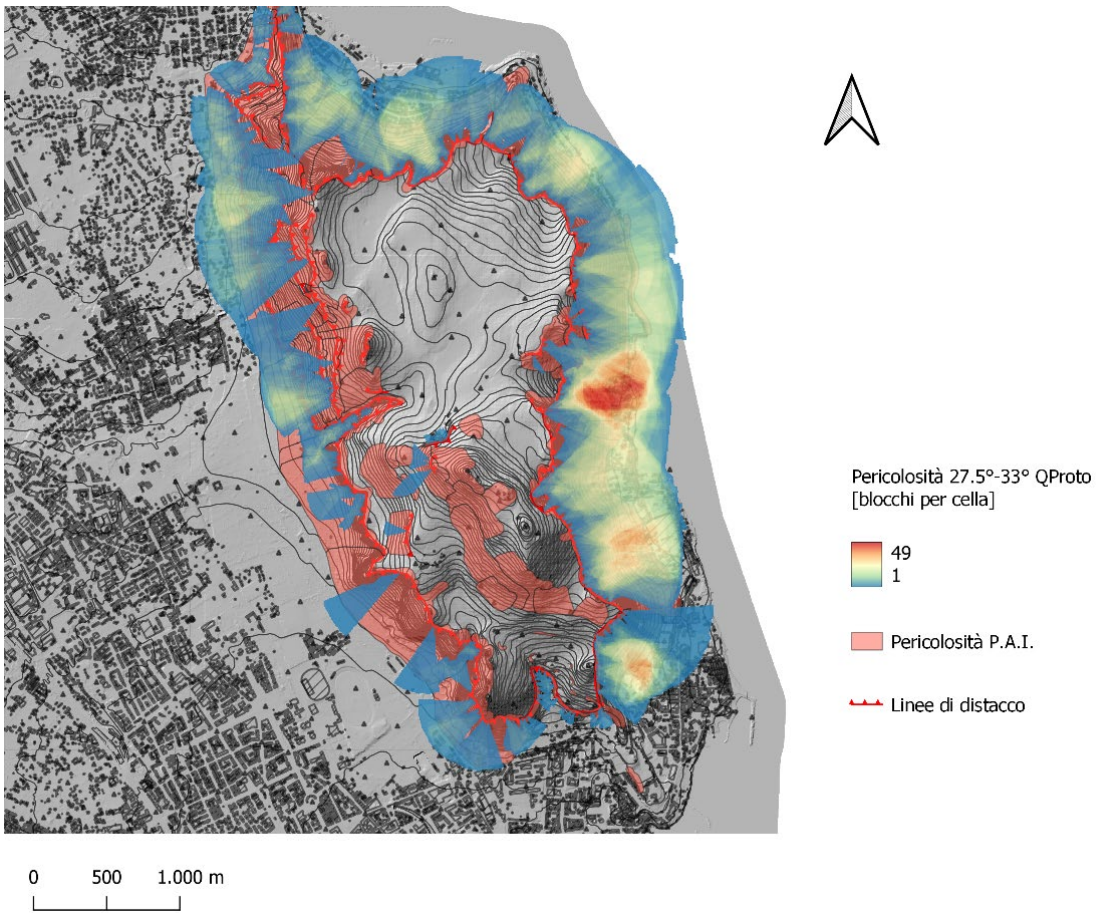

Figura 3.4 – Risultati dell'applicazione del plug-in QProto secondo le direttive regionali del Decreto Crolli.

Dalla figura 3.4 si può notare come le aree di invasione ottenute applicando il metodo empirico secondo la normativa abbiano tipicamente estensione maggiore rispetto a quelle individuate dalla mappa di pericolosità del P.A.I. Ciò può essere spiegato tenendo conto del fatto che le analisi di pericolosità del Piano per l'Assetto Idrogeologico sono realizzate utilizzando dei metodi con dettaglio maggiore, i quali permettono di valutare anche le caratteristiche sito-specifiche dei versanti. Come atteso, il metodo dei coni, essendo un metodo empirico, fornisce dei risultati cautelativi, in termini sia di estensione delle aree di invasione che di energia cinetica dei blocchi. Inoltre un angolo $\varphi_p = 2.7°$è estremamente cautelativo e ciò porta ad una sovrastima dell'area di visibilità.

3.2 Metodo per la stima dell'angolo di energia φ_p (Castelli et. al. 2021)

Sebbene il Decreto Crolli fornisca una valida guida per una prima valutazione della propagazione dei blocchi, specialmente nei casi in cui non si hanno informazioni sull'area oggetto di studio, la definizione dell'angolo di energia, da cui dipende l'affidabilità dell'analisi, può essere affinata per tener conto del contesto geomorfologico in esame.

In letteratura esistono numerose indicazioni sui valori da adottare, basate su valutazioni statistiche sulle zone di arresto osservate in diversi siti, ma tutte le valutazioni di pericolosità, anche mediante metodi semplificati, devono essere finalizzate ad ottenere dei risultati affidabili e non possono non considerare le proprietà del sito oggetto di studio. Un corretto approccio deve quindi tenere conto sia delle caratteristiche sito-specifiche del versante, in termini principalmente di pendenza, materiali e presenza di alberi, che delle caratteristiche dei blocchi (geometria, volume…).

Per esempio, sulla base di osservazioni di fenomeni reali e di analisi parametriche, Castelli et. al. 2021 hanno proposto un abaco per la determinazione dell'angolo di energia φ_p, noti la pendenza dell'area di propagazione, il volume del blocco di progetto e la percentuale di copertura boschiva, validi per blocchi isometrici. Sono da considerarsi valori cautelativi poiché nel 98% dei casi gli angoli di energia reali sarebbero maggiori e di conseguenza si avrebbe un'area di propagazione di estensione minore. Questo metodo può quindi essere utilizzato come punto di partenza per rapide analisi preliminari all'interno dell'ambiente Gis.

Per poter trovare una relazione tra le varie grandezze Castelli et. al. 2021 hanno utilizzato una regressione kriging stimando l'angolo di energia per versanti con pendenze comprese

tra 30° e 60° e blocchi con volume tra 0.1 m^3 e 10 m^3. Gli abachi proposti sono due, in funzione della densità di vegetazione (figura 3.5 e figura 3.6).

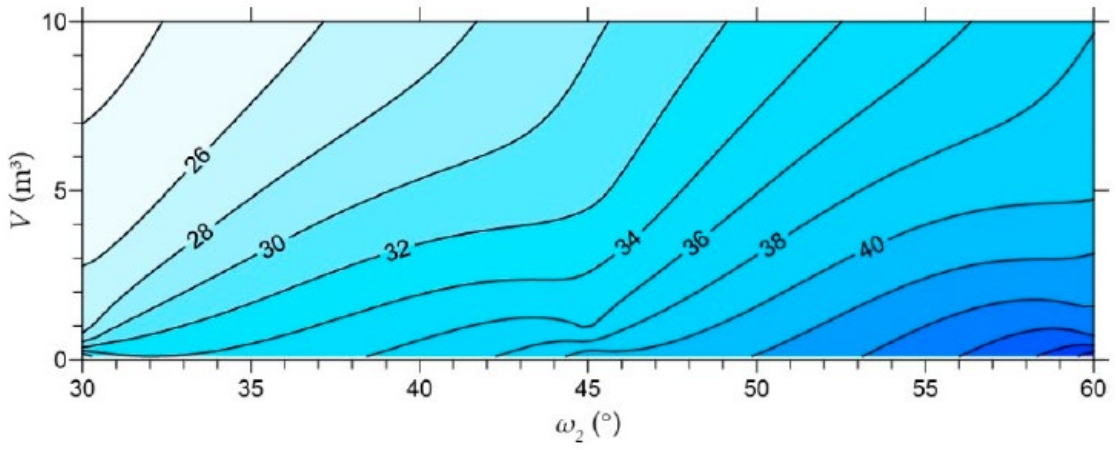

Figura 3.5 – Angolo di energia in funzione della pendenza del versante e del volume del blocco di progetto in assenza di vegetazione (Castelli et. al. 2021).

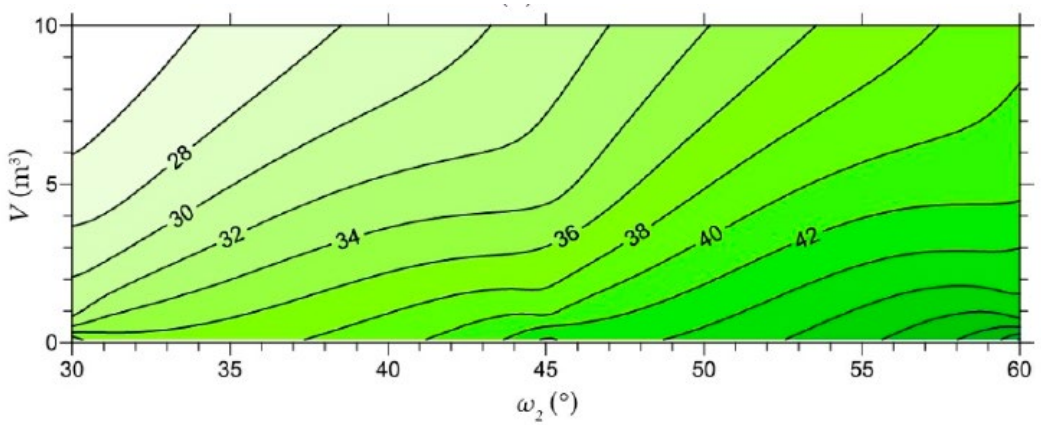

Figura 3.6 – Angolo di energia in funzione della pendenza del versante e del volume del blocco di progetto in presenza di vegetazione (Castelli et. al. 2021.

Si può osservare come:

- un aumento della densità della vegetazione comporta una mitigazione della pericolosità, con un relativo incremento dell'angolo φ_p;
- all'aumentare della dimensione del blocco diminuisce l'angolo φ_p, con conseguente aumento dell'area di invasione;
- all'aumentare dell'inclinazione del versante corrisponde un incremento dell'angolo φ_p con conseguente riduzione dell'area di invasione.

Tali risultati sono concordi con numerosi studi di letteratura ed osservazioni reali. Nell'ambito dello studio pubblicato, non è stato possibile definire una relazione tra le caratteristiche del versante e del blocco e l'angolo di apertura α il quale andrà definito sulla base del caso studio specifico.

Si ricorda come i risultati siano stati ottenuti in ambiente alpino e l'applicazione in contesti differenti, quale ad esempio quello dell'area di Monte Pellegrino non è banale. Uno degli obiettivi della presente tesi è anche di testare l'applicabilità della metodologia proposta da Castelli et. al. (2021) alle aree costiere-marittime.

3.3 Analisi preliminari con il metodo di Castelli et. al. 2021

Al fine di validare il metodo di Castelli et. al. 2021 per le falesie costiere è stato condotto un confronto tra i risultati ottenuti sulla base delle condizioni morfologiche del versante, analizzando la pendenza media delle aree di propagazione partendo del DEM 2x2 della Regione Sicilia e quelli ottenuti da Cappadonia et. al. 2021. Sono state considerate nuovamente come zone sorgente le linee di distacco in corrispondenza delle creste proposte dalla Professoressa Cappadonia.

Le analisi di Cappadonia et. al. 2021 derivano dallo studio dei crolli censiti dal dipartimento di Protezione Civile del Comune di Palermo e definiscono gli angoli di energia φ_p utilizzando il segmento congiungente il punto di distacco con il punto di arresto, applicando quindi una vera e propria back analysis. Il metodo proposto da Castelli et. al. 2021 è invece applicabile anche a quei casi in cui non si ha a disposizione il dato storico poiché la stima di φ_p è condotta sulla base delle caratteristiche geomorfologiche del sito.

Inoltre, come precedentemente detto, l'inventario dei crolli nell'area di Monte Pellegrino è relativamente recente (1998), di conseguenza è plausibile che negli anni precedenti si siano verificati crolli di blocchi con dimensioni maggiori o in zone ad oggi non segnalate. L'intervallo temporale ridotto rende anche incerta la stima della probabilità di distacco di diversi volumi e per tale motivo in questa analisi non si terrà conto della probabilità temporale.

Fatta tale premessa, si è passati all'analisi delle caratteristiche dei versanti e alla scelta dei differenti scenari. Data l'estensione dell'area di studio, la definizione delle aree di propagazione e quindi della pendenza media per poter utilizzare gli abachi in figura 3.5 e

figura 3.5 non è immediata. A tal fine sono state utilizzate le slope units proposte a livello nazionale da Alvioli et. al. 2020, le quali suddividono le zone dei rilievi in aree con caratteristiche geo-morfologiche simili (figura 3.7).

Figura 3.7 – Slope units dell'area di Monte Pellegrino secondo Alvioli et. al. 2020.

Non tutte le slope units sono però state utilizzare. È infatti necessario studiare le caratteristiche solo della zona a valle della sorgente, in cui avviene la propagazione dei blocchi. Inoltre, data la scala del lavoro originale di Alvioli et.al 2020, si è reso necessario un affinamento, eliminando parte di alcune slope units nella zona ovest poiché eccessivamente estese, ed ampliandole nella zona est poiché in caso contrario si sarebbero perse le caratteristiche morfologiche del versante, in particolare nell'area del cimitero di Santa Maria dei Rotoli (figura 3.8).

Figura 3.8 – Slope units modificate sulla base delle caratteristiche sito-specifiche.

Una volta fatto ciò è stato possibile definire le pendenze medie delle aree di propagazione per ogni punto sorgente. Per ciò che riguarda la vegetazione, considerati anche gli eventi del 2016 che hanno distrutto quasi completamente la macchia mediterranea presente, si è scelto, a favore di sicurezza, di utilizzare l'abaco in figura 3.4. Ulteriori considerazioni di maggior dettaglio verranno successivamente riportate.

Altro parametro fondamentale da dover determinare è il volume del blocco il quale è stato stimato utilizzando una distribuzione statistica dei volumi dei blocchi al piede riportata in figura 3.9 (Cappadonia et. al. 2021).

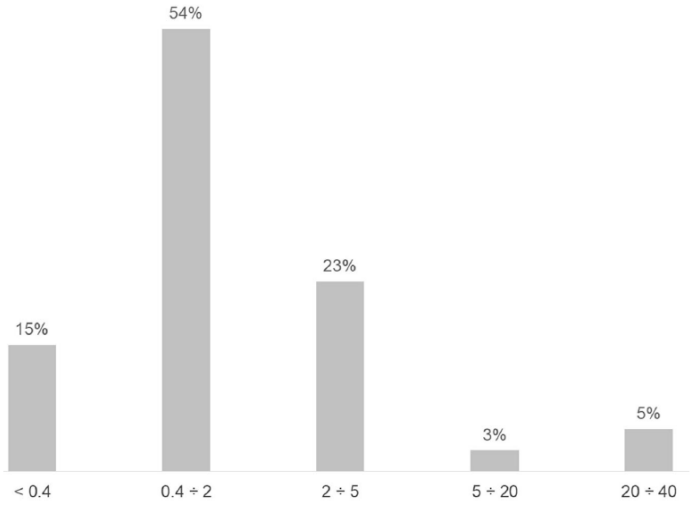

Figura 3.9 – Distribuzione dei volumi dei blocchi al piede osservati da Cappadonia et. al. 2021.

Dalla figura 3.9 si nota come la dimensione sia estremamente variabile, con volumi compresi tra qualche decimetro cubo e 40 m^3. Tale eterogeneità è dovuta al complesso sistema di faglie, stratificazioni e fratture che caratterizza l'intero massiccio di Monte Pellegrino.

Per tali ragioni si è scelto di analizzare 3 scenari di riferimento, con volumi pari a:

- 0,5 m^3;
- 2,5 m^3;
- 5 m^3;

All'interno dell'intervallo 0,5-5 m^3 ricade infatti la percentuale maggiore (circa 75%) di fenomeni di crollo censiti.

3.3.1 Volume di progetto 0,5 m^3

La prima analisi fa riferimento ad un volume di progetto di 0,5 m^3. I valori di φ_p, applicando l'abaco in figura 3.5, sono compresi tra 30° e 38° (figura 3.10).

Figura 3.10 – Energy angle utilizzati per lo scenario di caduta di un blocco con V=0,5 m^3.

Ad ogni punto sorgente è stato quindi attribuito un valore di esposizione [°], quota [m], propensione al distacco (posta sempre pari ad 1). L'angolo di dispersione laterale è costante e pari a 10°. In figura 3.11 si riportano i risultati ottenuti.

Figura 3.11 – Aree di propagazione ottenute con QProto per un blocco di progetto di volume 0,5 m^3.

Le aree risultano pressoché simili a quelle ottenute da Cappadonia et al.2021. Si osserva come l'analisi in QProto consenta di tener conto anche dei blocchi che potrebbero finire in mare. Tale condizione, seppur poco frequente, è documentata dalla presenza di massi nei primi metri dalla costa, notati durante la visita in sito. Gli angoli di energia φ_p utilizzati nello studio di Cappadonia et. al. 2021, differenziati sulla base del versante sono i seguenti:

- OVEST: $\varphi_p = 35°$
- EST: $\varphi_p = 37°$
- NORD: $\varphi_p = 42°$
- SUD: $\varphi_p = 42°$

I valori di energia cinetica ottenuti tramite l'analisi con QProto sono riportati in figura 3.12:

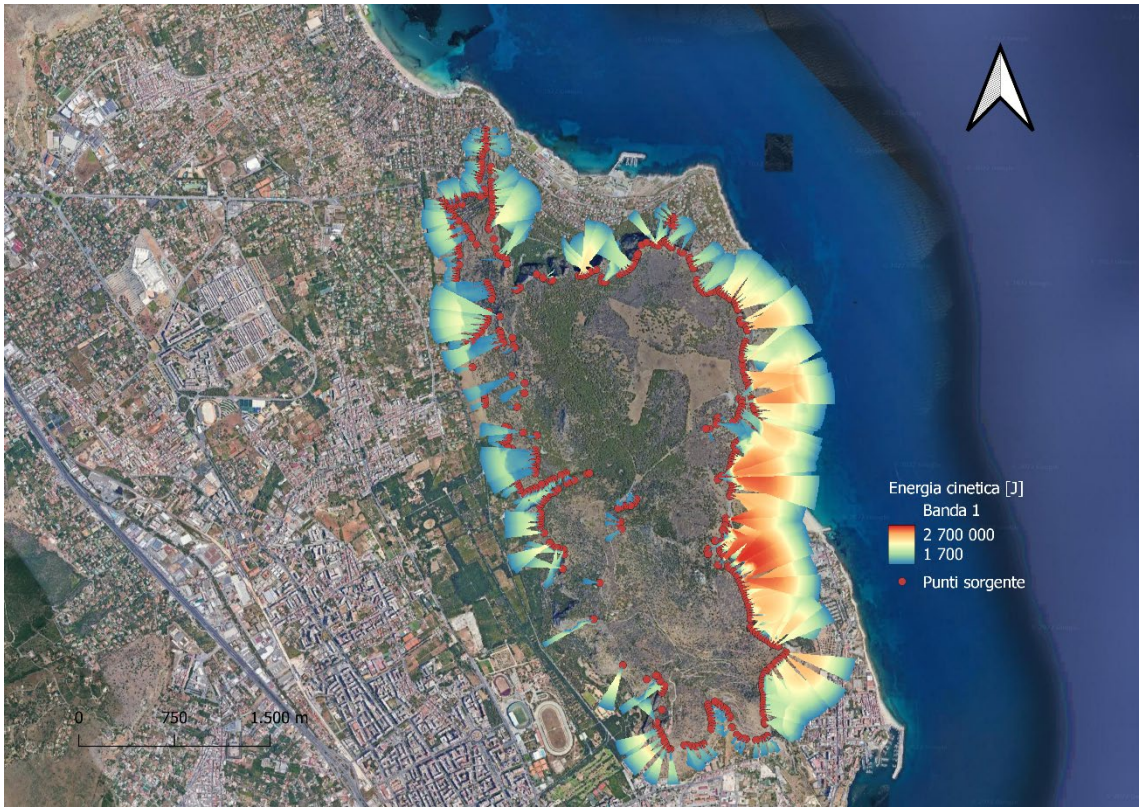

Figura 3.12 - Energia cinetica media [J] ottenuta con QProto per un blocco di progetto di volume 0,5 m^3.

L'energia massima è di circa 2700 kJ nella zona del cimitero di Santa Maria dei Rotoli (versante est) compatibile con il moto di un blocco con massa di 1250 kg (è stato assunto un peso specifico per roccia calcarea di circa 2500 kg/m^3) con una differenza di quota di circa 300 m. Si può quindi osservare come le energie massime si abbiamo in zone fortemente urbanizzate e di particolare interesse per la presenza di importanti vie di comunicazione (SS 113) che collegano la località turistica di Mondello al centro di Palermo. Tali risultati possono essere utilizzati per la valutazione della vulnerabilità degli elementi esposti nell'ambito di un'analisi di rischio alla media-grande scala, come verrà mostrato nel Capitolo 5.

3.3.2 Volume di progetto 2,5 m^3

Il secondo scenario di riferimento corrisponde ad un volume di 2,5 m^3. L'aumento del volume del blocco, secondo quanto riportato nell'abaco in figura 3.5, comporta una riduzione dell'angolo di energia del cono.

Si riportano in figura 3.13 gli angoli di energia φ_p utilizzati.

Figura 3.13 – Energy angle utilizzati per lo scenario di caduta di un blocco con V=2,5 m^3.

Analogamente a quanto descritto per lo scenario von V=0,5 m^3, è stato fatto un confronto tra le aree di invasione ottenuto mediante l'analisi con QProto e quelle definite dagli studi di Cappadonia et.al. 2021, rimaste invariate al variare del volume di progetto (figura 3.14).

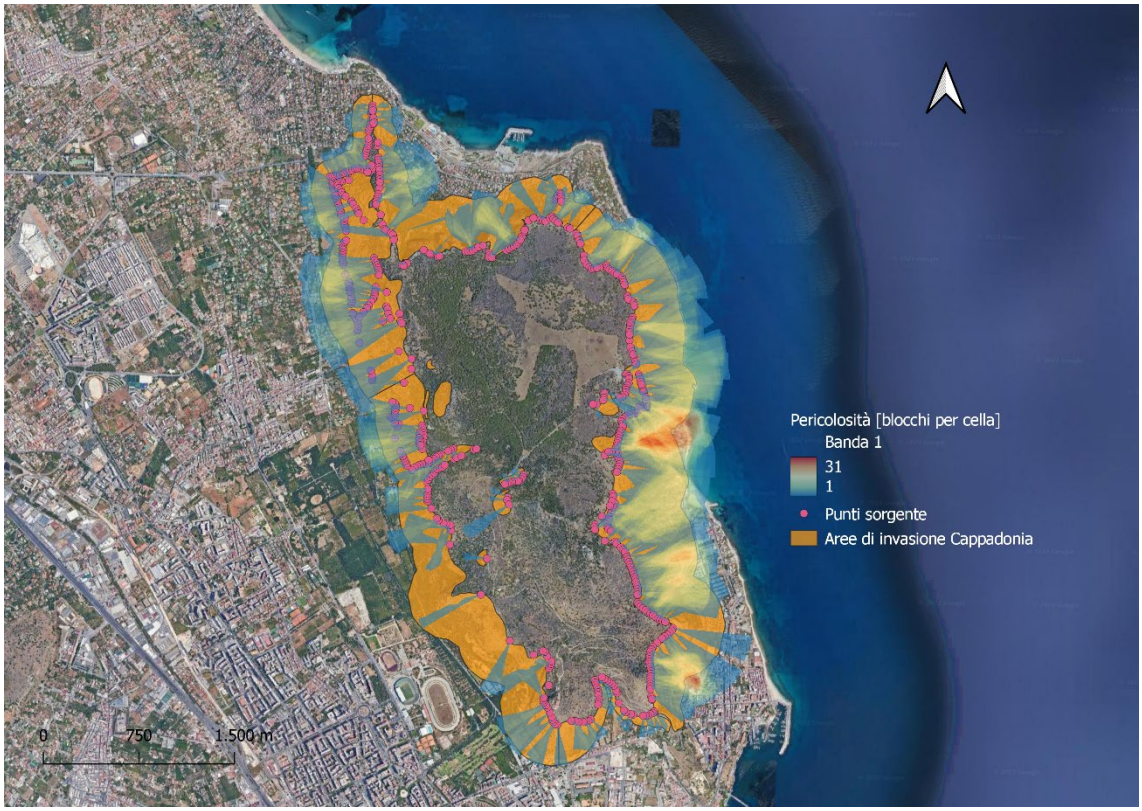

Figura 3.14 – Aree di propagazione ottenute con QProto per un blocco di progetto di volume 2,5 m^3.

Si nota che, come prevedibile, si ha un incremento dell'estensione delle aree interessate dai coni di propagazione a seguito dell'aumento del volume del blocco di progetto. Il plug-in QProto permette quindi di fare uno step in più rispetto ad altri applicativi, consentendo di apprezzare l'influenza delle caratteristiche non solo dei versanti ma anche dei massi stessi.

Le analisi in QProto indicano anche un aumento puntuale dell'energia cinetica, dovuta alla massa maggiore del blocco di progetto (figura 3.15).

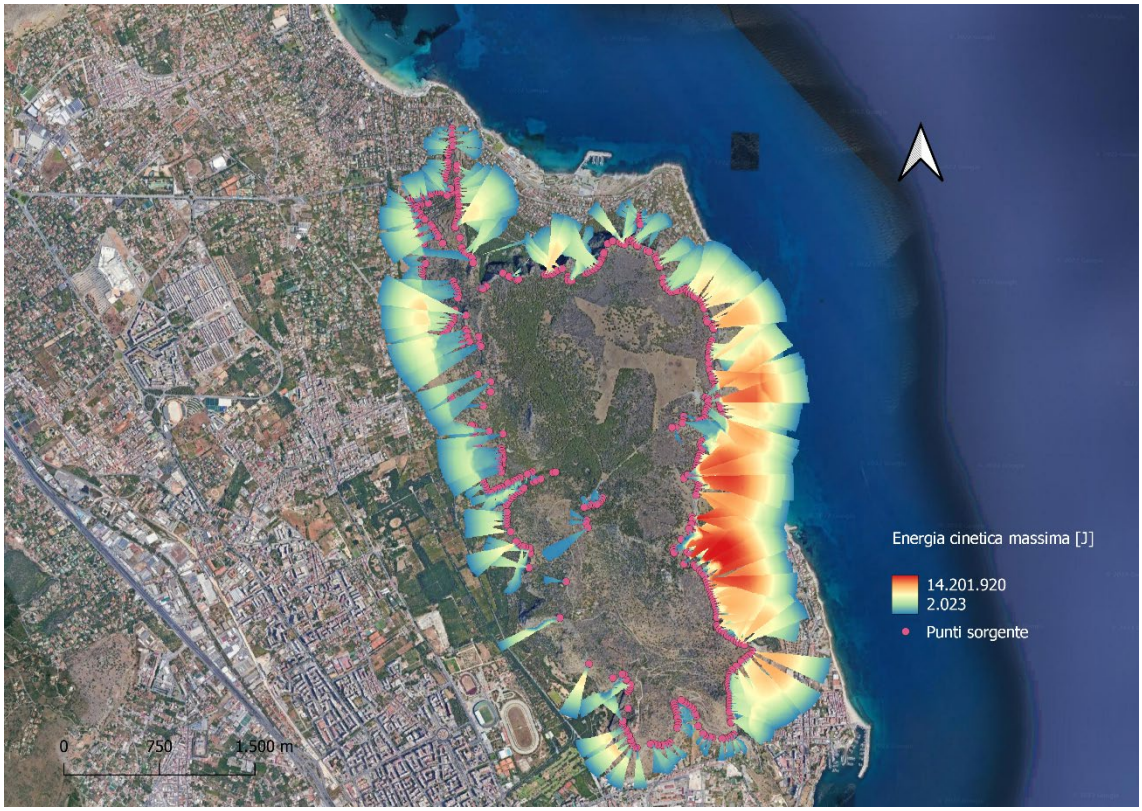

Figura 3.15 - Energia cinetica media [J] ottenuta con QProto per un blocco di progetto di volume 2,5 m^3.

Le aree più critiche, in termini di energia, sono nuovamente quelle alle pendici del versante est, esposto al mare. Le condizioni topografiche consentono infatti al blocco di raggiungere velocità, quindi energia cinetica, maggiori, specialmente in corrispondenza del cimitero di Santa Maria dei Rotoli. L'energia cinetica massima è di circa 14200 kJ, 5 volte maggiore rispetto a quella ottenuta con il masso di volume 0,5 m^3.

3.3.3 Volume di progetto 5 m^3

L'ultimo scenario di simulazione fa riferimento ad un volume di progetto pari a 5 m^3. L'iter di analisi è il medesimo dei precedenti scenari. L'angolo di energia è ulteriormente ridotto, con valori compresi tra 25° e 31°, in linea con quanto ci si aspetta dalla teoria all'aumentare del volume del blocco di progetto (figura 3.16).

Figura 3.16 – Energy angle utilizzati per lo scenario di caduta di un blocco con V=5 m^3.

Per alcuni punti sorgente, i risultati dell'analisi forniscono distanza di circa 600 m. La distanza massima di visibilità in QProto è stata impostata a 800 m, in modo da evitare di tranciare i coni di estensione maggiore sottostimando quindi l'area di invasione.

Si riportano i risultati ottenuti (figura 3.17).

Figura 3.17 – Aree di propagazione ottenute con QProto per un blocco di progetto di volume 5 m^3.

Le aree risultano molto più estese rispetto a quelle ottenute da Cappadonia et. al. 2021 e ciò è dovuto ai differenti angoli che sono stati utilizzati.

In modo analogo a quanto fatto per i due precedenti scenari di evento è stata calcolata l'energia cinetica dei blocchi per ogni cella dei coni di visibilità (figura 3.18).

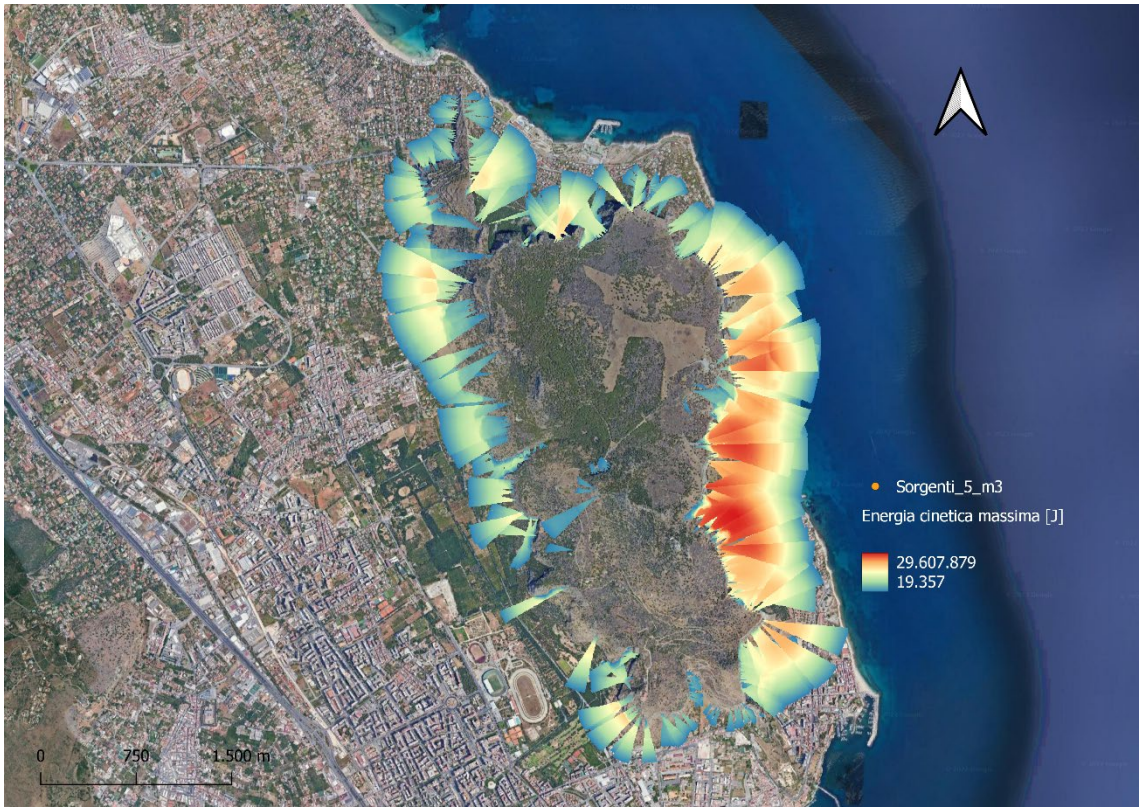

Figura 3.18 - Energia cinetica media [J] ottenuta con QProto per un blocco di progetto di volume 5 m^3.

L'energia massima, in corrispondenza del cimitero di Santa Maria dei Rotoli è di circa 29.000 kJ. Tale valore permette di constatare come la problematica non sia risolvibile semplicemente con l'installazione di barriere paramassi, poiché sul mercato sono disponibili dispositivi capaci di assorbire energie al massimo di 10000 kJ. Risulta quindi necessario realizzare interventi di stabilizzazione attiva o, nel caso in cui non fosse possibile o economicamente fattibile, interdire le aree in cui si attendono elevate energia, come già fatto in passato in aree limitrofe. Tali misure dovranno essere definite e dimensionate sulla base di analisi di dettaglio.

3.4 Considerazioni sui risultati

Le tre differenti analisi hanno fornito dei risultati in linea con quanto riportato nella letteratura, con un incremento dell'area di visibilità del cono e delle energie all'aumentare delle dimensioni del blocco.

I risultati, in termini di estensione delle aree di invasione, per lo scenario con un masso di volume 0,5 m^3 sono simili a quelli ottenuti negli studi di Cappadonia, mentre per volumi maggiori si osserva una consistente differenza. Essendo un'analisi di visibilità e quindi un metodo empirico, l'output dipende infatti fortemente dall'angolo di energia utilizzato.

Il plug-in QProto permette di definire gli scenari sulla base delle caratteristiche dei versanti in cui avviene la propagazione e quelle del blocco stesso, mentre lo studio di Cappadonia et. al. 2021 è basato sui dati storici, disponibili per gli ultimi 25 anni, e trascura gli effetti del volume del blocco.

Inoltre, è plausibile che, nel periodo antecedente al 1998, siano avvenuti altri distacchi, con massi che possono aver percorso distanze maggiori e di cui oggi non si ha testimonianza. Le discrepanze sono quindi da ricercarsi nel differente approccio utilizzato.

Infine è importante aggiungere che l'analisi con QProto ha fatto riferimento all'abaco in figura 3.5 il quale considera una completa assenza di 0vegetazione. In realtà, specialmente negli anni precedenti il 2016, essa era ampiamente diffusa e ciò ha probabilmente influenzato i risultati, rendendoli molto conservativi.

Infine, il metodo dell'angolo di visibilità non tiene conto della presenza di eventuali ostacoli, quali edifici, strade, barriere, guard-rail ecc.… che svolgono un ulteriore ruolo di mitigazione, trascurate sia nell'analisi proposta che in quella di Cappadonia et. al. 2021

Capitolo 4

Valutazione della pericolosità con il plug-in QProto

4.1 Identificazione delle aree sorgente

Definita l'applicabilità di QProto al caso studio in analisi, mediante il confronto con i risultati ottenuti da altri autori, si vuole effettuare un'analisi previsionale al fine di individuare le aree a pericolosità maggiore, in termini di energia del blocco e di propensione al distacco del punto sorgente che genera il fenomeno, base di partenza delle analisi di rischio.

Per l'identificazione delle aree sorgente si è fatto riferimento nuovamente alle linee guida del P.A.I. della Regione Sicilia, analizzando le aree indicate come "soggette a dissesto".

Tipicamente, le zone sorgente possono essere riconosciute mediante rilievi di campo o tele-rilievi. Nell'ambito ambito della presente tesi, volendo definire una pericolosità ad ampia scala, ci si è basati (come da indicazione del P.A.I.) sullo studio delle caratteristiche morfologiche del territorio in ambiente Gis, vista anche l'impossibilità di avere informazioni relativamente alle proprietà geomeccaniche dell'ammasso.

Secondo il P.A.I., oltre i punti sorgente individuati eventualmente con i rilievi, devono essere considerate anche tutte le zone di potenziale distacco con pendenze superiori ai 40°, derivate dal DEM -sempre con dettaglio pari o superiore al DEM 2x2 della Regione Sicilia-.

Si riportano in figura 4.1 e in figura 4.2 rispettivamente le aree con pendenza superiore a 40° e le aree a dissesto indicate nel P.A.I.

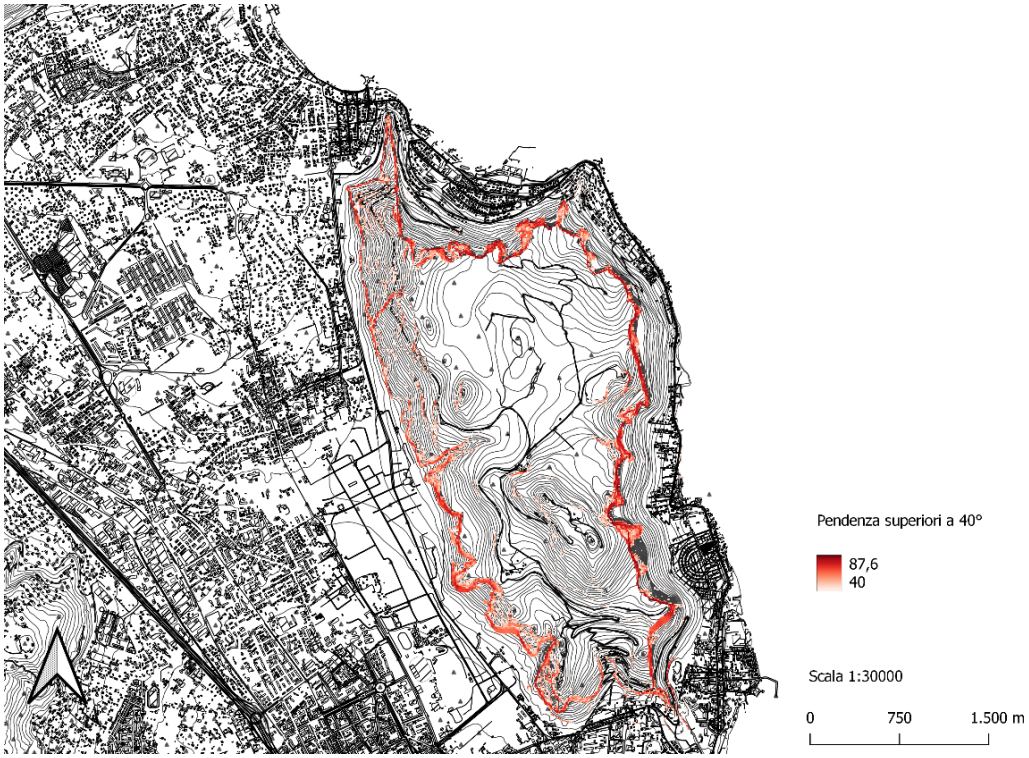

Figura 4.1 – Aree di Monte Pellegrino con pendenza superiore a 40°.

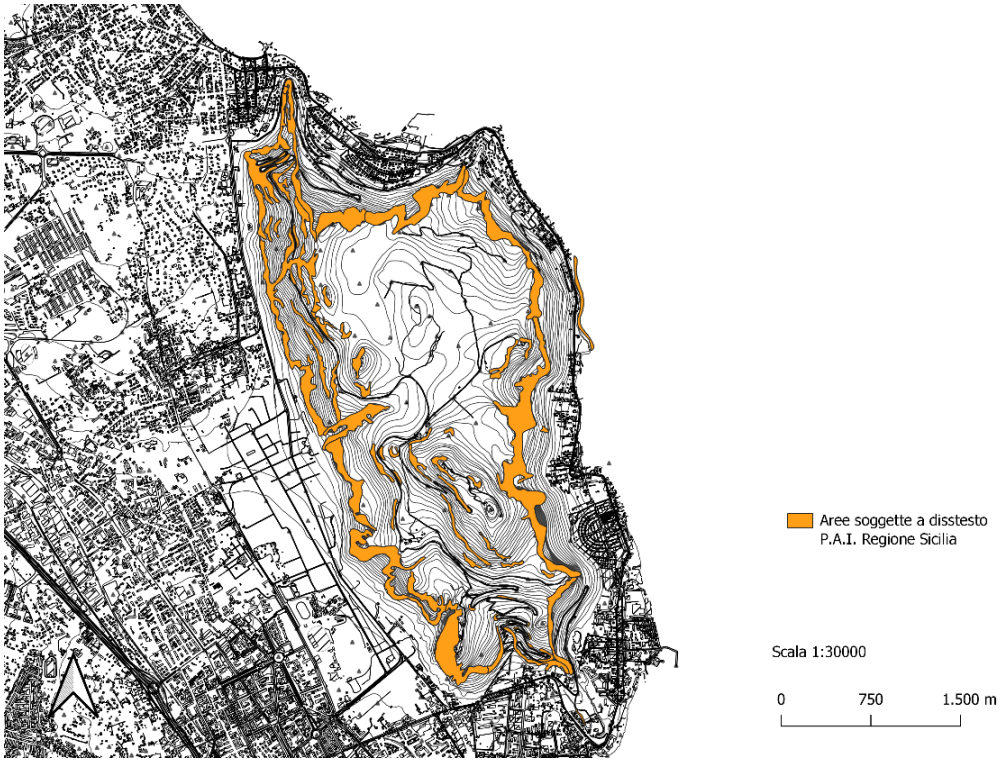

Figura 4.2 – Aree di Monte Pellegrino soggette a dissesto geomorfologico (crolli in roccia) secondo il PAI.

Dalle figure 4.1 e 4.2 si può notare che, tendenzialmente, le aree indicate dal P.A.I. come potenzialmente soggetto a dissesto corrispondano alle zone con pendenze superiori a 40°. Tramite la sovrapposizione delle due precedenti mappe, considerando quindi le aree soggette a dissesto con pendenza > 40°, sono state dunque definite le aree sorgente (figura 4.3).

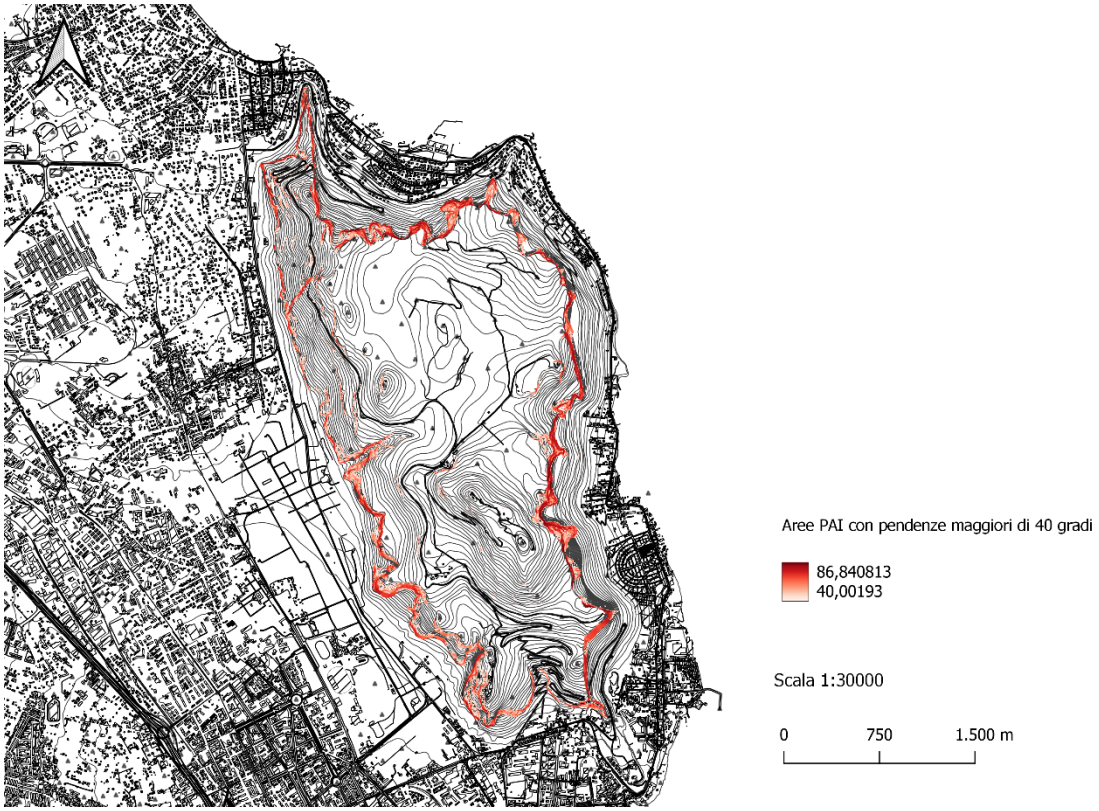

Figura 4.3 – Aree di Monte Pellegrino soggette a dissesto geomorfologico (crolli in roccia) secondo il PAI con pendenza maggiore di 40°.

A partire dalle sorgenti così definite sono state condotte le analisi di QProto seguendo due approcci, uno basato sulle linee guida regionali per la modellazione dei fenomeni di caduta massi con metodi speditivi (P.A.I. Capitolo 11), così come era stato proposto nel paragrafo 3.1, con angoli di energia rispettivamente di 27,5° e 33° sulla base delle caratteristiche del versante in cui avviene la propagazione, il secondo invece basato sull'utilizzo dei grafici in figura 3.5 e figura 3.6, che tiene quindi conto delle caratteristiche geomorfologiche, di vegetazione e del volume del blocco.

Come ulteriore passo in avanti nell'affinamento del metodo le zone sorgente sono state suddivise in porzioni omogenee, dal punto di vista dell'alterazione, utilizzando le informazioni raccolte durante il sopralluogo al Monte Pellegrino.

Così facendo è stato possibile attribuire una propensione al distacco media a larga scala che consente di pesare l'influenza di diverse aree sorgenti e di individuare le porzioni di territorio più critiche alle quali poi applicare dei metodi più raffinati per una modellazione di dettaglio.

Inoltre, utilizzando l'archivio dei crolli del dipartimento di Protezione Civile di Palermo, per ogni area è possibile scegliere un volume differente. La dimensione del blocco di progetto influenza sia l'energia cinetica, quindi la pericolosità, ma anche l'angolo di energia. È importante ricordare che, dato il breve intervallo di tempo nel quale si hanno delle informazioni sui crolli, risulta impossibile attribuire ad un volume un tempo di ritorno poiché l'incertezza associata sarebbe molto elevata.

4.2 Volumi di progetto e propensione al distacco

L'inventario dei fenomeni di crollo rappresenta una valida base per poter definire il volume di progetto per le differenti aree sorgente. Il dato storico è infatti di fondamentale importanza per la calibrazione dei modelli previsionali. In caso di assenza di dati storici, per la definizione dei volumi è possibile analizzare i massi presenti al piede, ma questo approccio può portare ad una sottostima del valore reale. Durante la propagazione è infatti probabile che il blocco, a seguito degli impatti con il terreno, si frammenti e ciò può aver influenzato la valutazione del volume anche nell'archivio disponibile.

L'analisi delle fratture in parete è un'altra metodologia che può essere utilizzata. L'insieme delle discontinuità porta infatti all'isolamento di porzioni di roccia e la spaziatura tra le stesse ne determina la geometria, in termini di forme e dimensione. Lo stato di alterazione delle fratture, l'apertura, la presenza di materiale di riempimento o

acqua, caratterizza invece la stabilità del masso e di conseguenza la propensione al distacco.

Durante la visita in sito è stata fatta un'analisi qualitativa, finalizzata alla caratterizzazione dei versanti in termini di fratturazione e stato di alterazione, dovuta a numerosi fenomeni quali l'azione di erosione delle acque, meccanica, bioclastismo, carsismo, seguendo le indicazioni fornite dalla Professoressa Cappadonia.

Un effetto di alterazione a cui è stata prestata particolare attenzione per i versanti esposti verso il mare è quello dello spray marino che ha un'azione corrosiva sulle rocce dell'ammasso di Monte Pellegrino, in quanto prevalentemente di origine carbonatica. La differenza è visibile specialmente considerando il versante prospicente il parco della Favorita e quelli posti a distanza minore dalla costa.

Nonostante sia probabile che la presenza del mare svolga un'azione instabilizzante nei confronti della roccia carbonatica e la densità di crolli nella parte est, più vicina alla costa, risulta maggiore che in altre zone, a questa scala di dettaglio non è possibile affermare con certezza quali siano le cause del weathering né quantificarne l'effetto sulla stabilità delle pareti. Sarebbe opportuno effettuare un confronto più approfondito sul solo versante est, poiché le condizioni geomorfologiche sono simili e si potrebbero considerare gli effetti di distanza dal mare. Nonostante Monte Pellegrino sia un ammasso di natura carbonatica, le caratteristiche variano infatti notevolmente anche a distanze ravvicinate. Ciò che è possibile dire è che nella zona più esposta al mare i volumi sono tipicamente ridotti come risultato di una maggiore alterazione. I versanti distanti dalla costa sono inoltre caratterizzati da una macchia mediterranea più sviluppata. Al fine di poter assegnare alle differenti porzioni un volume di progetto e una propensione al distacco,

variabile tra *MEDIA, MEDIO-ALTA* ed *ELEVATA,* si differenziano i versanti sulla base della loro esposizione.

4.2.1 Versante Sud-Est

Nell'area sovrastante il cimitero di Santa Maria dei Rotoli si ritrovano delle pareti sub verticali con presenza di numerosi piani di faglia. Muovendosi verso Nord, in direzione di Mondello lungo la SS13 si osserva una variazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso; infine, alle quote maggiori la vegetazione è scarsa, anche a causa del vasto incendio del 2016, mentre più a valle sono presenti diversi alberi ad alto fusto.

La propensione al distacco, sulla base della fratturazione, l'azione del carsismo, le caratteristiche geomorfologiche, viene considerata *MEDIA*. Durante il moto dei blocchi sono possibili rimbalzi per la presenza di roccia affiorante alle quote minori. Si riporta una tabella con i fenomeni di caduta massi censiti in questa porzione di versante, derivante dall'archivio dei crolli della Protezione civile di Palermo (tabella 4.1).

Tabella 4.1 – Crolli censiti e volumi disponibili nell'archivio del Dipartimento della Protezione Civile di Palermo per il versante Sud-Est.

VERSANTE SUD-EST	Volume [m3]	Data
CR-77	3	
CR-4	40	1/09/1998
CR-32	6	20/10/2005
CR-5	1,4	14/09/1998
CR-6	2,5	01/01/2001
CR-11	2,5	17/01/2002
CR-45	/	30/01/2008
CR-79	3	03/11/2018
CR-60	3	08/10/2012
CR-42	1,5	18/11/2007
CR-7	0,6	01/06/2001
CR-12	/	07/02/2002

4.2.2 Versante Nord-Est

Procedendo verso Nord lungo la SS 113 si ritrova il Belvedere di Monte Pellegrino. L'alterazione, con presenza di forme carsiche, è maggiore e aumenta anche la densità di fratturazione. Si possono osservare anche dei blocchi in mare, derivanti da fenomeni di crollo passati. Date le condizioni appena descritte, si attribuisce a questa zona una propensione *ELEVATA* e *MEDIO-ALTA* per l'area tra il cimitero e il Belvedere. I crolli censiti sono elencati in tabella 4.2.

Tabella 4.2 – Crolli censiti e volumi disponibili nell'archivio del Dipartimento della Protezione Civile di Palermo per il versante Nord-Est.

VERSANTE NORD EST	Volume [m3]	Data
CR-58	Elemento lapideo	11/01/2012
CR-73	Modeste dimensioni	04/10/2014
CR-49	1	09/08/2009
CR-72	Media dimensione	16/08/2014
CR-50	/	17/08/2009
CR-13	1,3	01/09/2002
CR-44	Modeste dimensioni	09/12/2007
CR-23	piccole dimensioni	19/09/2004
CR-51	0,6	12/09/2009
CR-68	Elementi lapidei	01/10/2013
CR-74	Grande dimensione	31/12/2014
CR-75	Modeste dimensioni	05/09/2015
CR-57	Elementi lapidei	08/10/2011

4.2.3 Versante Nord

Nell'area del porticciolo, alla base del versante Nord, l'assetto continua a cambiare con presenza di elementi lapidei posti a quote elevate. Il carsismo è più spinto e si ha inoltre la presenza di lineamenti tettonici e sfettamenti che hanno dissecato l'ammasso roccioso, generando delle forme geometriche simili a dei conci. L'alterazione è molto elevata e si ha anche una variazione dei possibili cinematismi di distacco (wedge failure, plane failure, free-fall, ribaltamenti). La macchia mediterranea è presente e sono stati realizzati alcuni interventi di mitigazione del rischio quali chiodature e/o barriere paramassi, ad

oggi non funzionale a causa di scarsa manutenzione. Rispetto alle zone precedenti la propensione al distacco è crescente e indicata come *ELEVATA.* I crolli censiti sono elencati in tabella 4.3.

Tabella 4.3 – Crolli censiti e volumi disponibili nell'archivio del Dipartimento della Protezione Civile di Palermo per il versante Nord.

VERSANTE NORD	Volume [m3]	Data
CR-47		
CR-21	0,06	19/04/2004
CR-55	0,5	01/07/2010
CR-71	1,5	06/05/2014
CR-30	media	02/03/2005
CR-31	media	11/04/2005
CR-36	piccole	01/02/2007
CR-37	varie	01/02/2007
CR-22	detrito	17/09/2004
CR-64	0,06	17/03/2013
CR-80	3	03/09/2015
CR-34	singolo	22/08/2006
CR-56	0,02	26/09/2011
CR-24	0,006	27/09/2004
CR-76	media	19/01/2017
CR-19	media	26/08/2003
CR-63	0,6	16/03/2013
CR-69	varie	15/11/2013
CR-82	piccole	07/02/2018
CR-16	detriti	29/04/2003
CR-17	piccole	29/05/2003

4.2.4 Versante Ovest

Aggirando Monte Pellegrino, superando quindi la zona di Mondello, si ritorna verso Sud seguendo il versante Ovest. La vegetazione è scarsa e la fratturazione è spinta, con isolamento di blocchi di piccole dimensioni. Procedendo verso sud tale fenomeno si

acuisce, così come l'alterazione e le pendenze, portando ad un aumento della propensione al distacco. In alcuni punti del versante Nord-Ovest sono state effettuate delle prove con sclerometro alla base della parete, riscontrando buoni risultati, con un numero di rimbalzi compreso tra 50-60. Il versante Sud-Ovest ha invece resistenze meccaniche minori e la propensione al distacco è elevata per la presenza di affioramenti molto alterati.

I crolli censiti lungo il versante Ovest sono i seguenti nelle tabelle 4.4 e 4.5.

Tabella 4.4 – Crolli censiti e volumi disponibili nell'archivio del Dipartimento della Protezione Civile di Palermo per il versante Nord-Ovest.

NORD OVEST	Volume [m3]	Data
CR54	media	23/03/2010
CR81	0,7	11/05/2015
CR18	medie	01/08/2003
CR28	singolo	16/11/2004
CR33	0,3	24/03/2006
CR53	0,4	31/01/2010
CR20	0,03	11/12/2003
CR41	varie	22/10/2007
CR35	1	19/12/2006
CR14	4	05/12/2002
CR52	1,5	06/10/2009
CR46	0,4	25/09/2008
CR70	2,7	24/11/2013
CR78	varie	03/11/2018

Tabella 4.5 – Crolli censiti e volumi disponibili nell'archivio del Dipartimento della Protezione Civile di Palermo per il versante Sud-Ovest.

SUD OVEST	Volume [m^3]	Data
CR15	20	01/01/2003
CR38	2	30/03/2007
CR10	1,5	07/11/2001
CR48	0,6	13/05/2009

4.2.5 Caratterizzazione dell'area

Dalle osservazioni delle tabelle (da 4.1 a 4.5) i volumi sono quindi variabili nell'intera area del Monte Pellegrino e sulla base delle osservazioni risultano decrescenti lungo il versante Est da Sud verso Nord. Sono presenti alcune opere, non considerate nelle analisi, che non svolgono più la loro funzione poiché non hanno ricevuto una corretta manutenzione. La propensione è tipicamente maggiore nel versante Est, esposto al mare.

Sulla base della visita in sito, dell'osservazione dei blocchi al piede o in aree limitrofe, dell'inventario dei fenomeni di crollo del dipartimento di Protezione Civile del Comune di Palermo, cercando di porsi in una condizione a favore di sicurezza, per la definizione della pericolosità da caduta massi si utilizzano i seguenti volumi riportati in tabella 4.6, differenziati per i vari settori del rilievo di Monte Pellegrino assunti come omogenei.

Tabella 4.6 – Volume di progetto [m^3] per ogni porzione di versante sulla base dei crolli censiti.

VERSANTE	VOLUME DI PROGETTO [m^3]
Sud-Est	5
Nord-Est	2,5
Nord	2
Nord-Ovest	2,5
Sud-Ovest	5
Sud	5

Per poter effettuare una simulazione tenendo conto della propensione al distacco, in QProto è necessario fornire una stima della stessa, attribuendo un valore compreso nell'intervallo 0-1 ad ogni punto sorgente. Tale parametro è di fondamentale importante per la valutazione della pericolosità poiché è un peso nella valutazione delle aree di invasione e dell'energia e permette di ottenere le porzioni di territorio più propense a generare fenomeni di caduta massi. Esso è correlato al dato storico, inteso come numero di fenomeni che si sono originati in quell'area, densità di fratturazione, inclinazione dei versanti, combinati con valutazione speditive in sito. Il passaggio dalla valutazione qualitativa *MEDIA, MEDIO-ALTA, ELEVATA* a quella quantitativa viene definito in tabella 4.7.

Tabella 4.7 – Propensione al distacco per ogni porzione di versante definita sulla base del dato storico e delle osservazioni qualitative in sito.

VERSANTE	PROPENSIONE QUALITATIVA	ID
Sud-Est	MEDIA	0.6
Nord-Est	MEDIO-ALTA	0.8
Nord	ELEVATA	1
Nord-Ovest	MEDIA	0.6
Sud-Ovest	MEDIO-ALTA	0.8
Sud	MEDIA	0.6

4.3 Analisi di pericolosità secondo il decreto crolli

Come già proposto nel Capitolo 3, una prima analisi delle aree di invasione può essere fatta seguendo quanto indicato nel Capitolo 11 del P.A.I. della Regione Sicilia in termini di angolo di energia φ. Questo metodo è una valida base per avere un inquadramento generale del fenomeno in assenza di informazioni sulle caratteristiche dei versanti o sui blocchi e si basa esclusivamente sulla pendenza dell'area di propagazione. I valori che sono stati utilizzati sono rispettivamente 27.5° e 33° mentre, non essendo disponibili indicazioni sull'angolo di apertura del cono (angolo di dispersione laterale), esso è stato considerato pari a 10° (figura 4.4).

Figura 4.4 – Angoli di energia utilizzati secondo il metodo speditivo regionale del Decreto Crolli Regione Sicilia.

La procedura per l'estrazione dei punti sorgente si basa sulle aree riportate in figura 4.3; per ogni cella dell'immagine raster è stato estratto un centroide, per un totale di 3163 punti sorgente. Dato l'elevato numero di punti, in un'analisi a media scala, la valutazione puntuale delle caratteristiche dei blocchi instabili è irrealizzabile ed è invece essenziale la suddivisione dei versanti in porzioni omogenee.

In questa prima valutazione della pericolosità, seppur speditiva e finalizzata esclusivamente alla verifica dell'applicabilità del metodo, sono state considerate le propensioni al distacco delle varee zone secondo quanto definito in tabella 4.7, al fine di comparare i risultati con le aree di pericolosità proposte nel P.A.I. In figura 4.5 si riporta un confronto tra la mappa di pericolosità del P.A.I. e quella di suscettibilità ottenuta mediante l'applicazione di QProto.

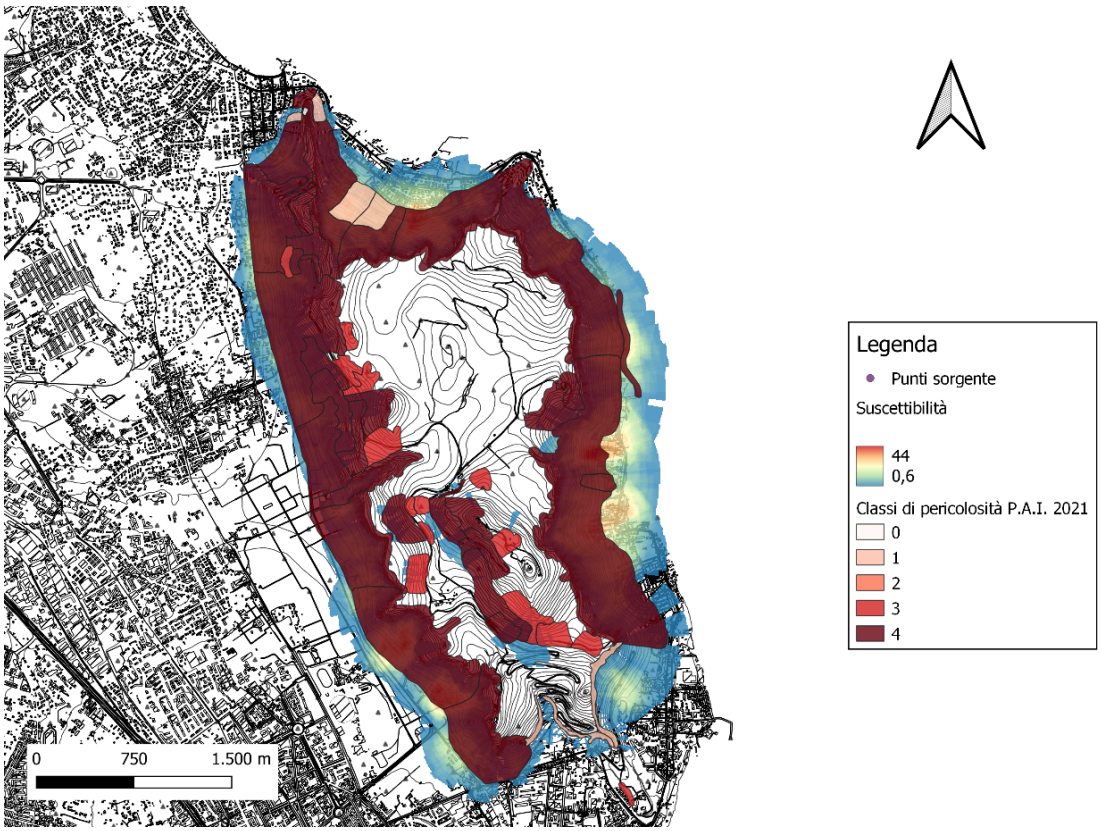

Figura 4.5 – Analisi QProto secondo il metodo speditivo regionale del Decreto Crolli Regione Sicilia e confronto con le aree di pericolosità definite dal PAI vigente.

I risultati ottenuti, sebbene derivanti da un approccio estremamente semplificato, sono molto indicativi. Considerando il versante Ovest si osserva come le aree di invasione siano pressoché sovrapponibili ed il metodo regionale speditivo (decreto crolli) implementato in QProto fornisca delle aree di visibilità di estensione maggiore rispetto a quelle disponibili nel P.A.I., in linea con i principi dei metodi empirici. Il medesimo risultato è particolarmente accentuato lungo il versante Est è ciò è dovuto sia alla particolare morfologia del territorio che all'angolo utilizzato, pari prevalentemente a 27.5° e quindi estremamente conservativo. Tuttavia, un'estensione tale delle aree di invasione non è comunque da escludere, come testimoniato anche dalla presenza di blocchi di notevole dimensione nei primi metri della costa. Si ricorda infine come la

valutazione della suscettibilità, derivante da un conteggio pesato sulla propensione al distacco del numero di punti sorgente che vengono "visti" dall'i-esima cella, non fornisca indicazioni sulla pericolosità, la quale è invece correlata all'energia cinetica del blocco passante.

4.4 Analisi di pericolosità secondo il metodo di Castelli et.al. 2021

Al fine di affinare le analisi precedenti, per tener conto delle caratteristiche geometriche del blocco, della pendenza del versante in cui avviene la propagazione e della presenza di vegetazione, si è proceduto con una nuova analisi secondo il metodo proposto da Castelli et. al. (2021).

Per la valutazione della pendenza del versante sono state utilizzate le slope units di Alvioli et. al. 2020, opportunamente modificate, in modo analogo a quanto fatto nel paragrafo 3.3. Essendo infatti il risultato di un lavoro a livello nazionale è possibile adattarle alla propria area di studio.

Per ogni slope unit è stato creato un file di punti, estraendo i centroidi per ogni cella ed associando ad essi il valore di pendenza derivato dal DTM 2x2 della Regione Sicilia calcolandone infine la media. Inoltre, sulla base delle osservazioni in sito, per alcune aree si farà riferimento alla presenza di vegetazione, in particolare in corrispondenza delle slope units 2139, 1696, 1810, 1671, 1710, 1643, 1585, 2077 e 2014. Inoltre le slope units 2014, 2248 e 1992 sono caratterizzate da pendenze medie inferiori a 30°, di conseguenza non è stato possibile utilizzare gli abachi in figura 3.5 e figura 3.6. Per ovviare a ciò, per tali slope units è stato applicato il metodo del Decreto Crolli.

Figura 4.6 – Slope units modificate in base alle caratteristiche sito-specifiche.

A seguito dell'incendio del 2016 la pericolosità per la caduta massi è notevolmente aumentata inquanto la macchia mediterranea, distrutta durante l'evento, è stata sostituita da vegetazione infestante la quale non svolge un sostanziale effetto di mitigazione per la propagazione dei massi. Gli effetti dell'incendio possono essere compresi comparando la situazione pre e post evento riportate rispettivamente in figura 4.7 e in figura 4.8.

Figura 4.7 – Stato della vegetazione sui versanti di Monte Pellegrino prima dell'incendio del 2016.

Figura 4.8 – Stato della vegetazione sui versanti di Monte Pellegrino ad oggi (2022).

Le conseguenze maggiori sono visibili specialmente lungo il versante Est il quale è caratterizzato da un rischio maggiore per la presenza del cimitero, di numerose abitazioni e della trafficata SS113.

La simulazione tiene quindi conto della presenza di vegetazione solo nelle aree non colpite dall'incendio, ovvero i versanti sovrastanti il cimitero, la zona ADDAURA e i versanti esposti a Sud-Ovest.

Definiti tutti i parametri di input per QProto è stata quindi effettuata l'analisi, di cui si riporta in figura 4.9 l'output in termini di aree di invasione, confrontate con quelle del P.A.I.

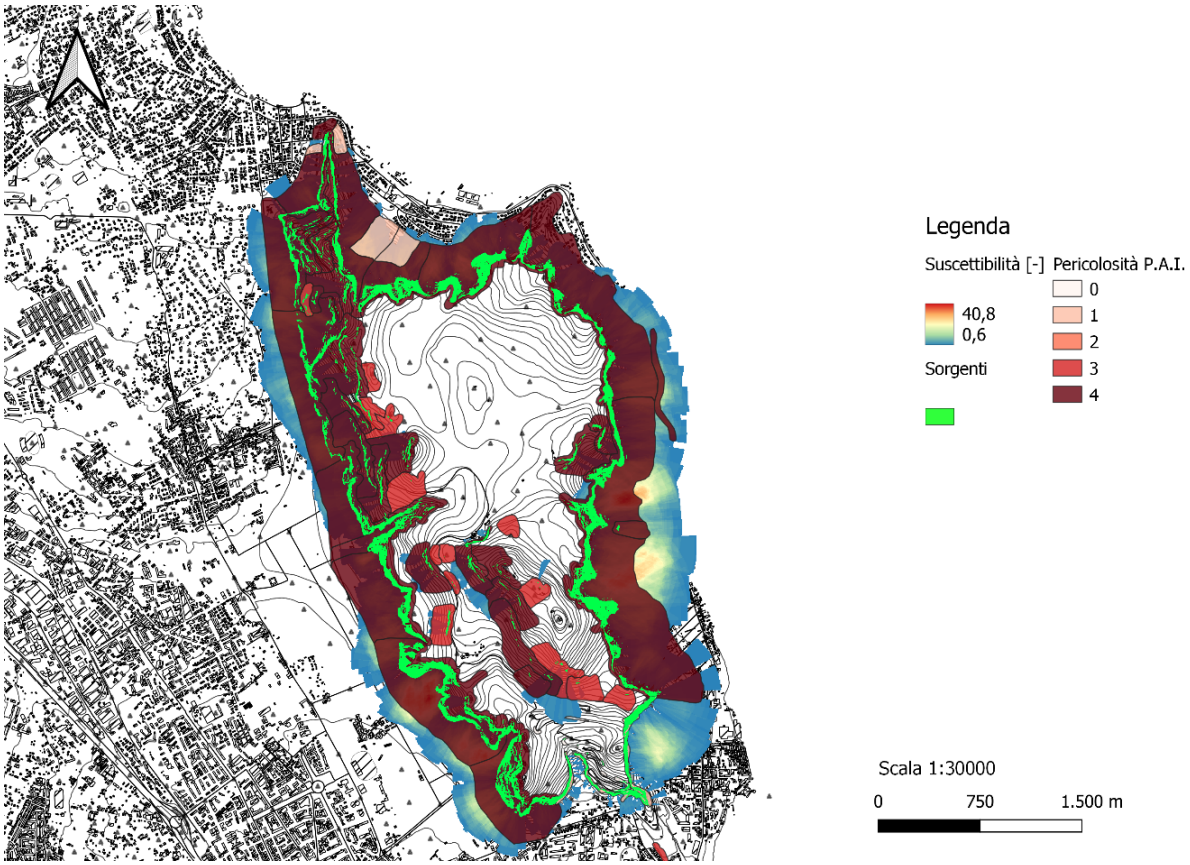

Figura 4.9 – Sorgenti utilizzate, aree di invasione ottenute mediante l'applicazione di QProto e confronto con le aree di pericolosità definite nel PAI vigente (Regione Sicilia).

Nel confronto con le aree di pericolosità mappate dal P.A.I. i risultati sono pressoché simili, ad eccezione di alcune porzioni di territorio lungo la costa. Questa condizione potrebbe portare alla scelta di utilizzare metodi più raffinati per tali aree. Nonostante ciò lo scenario proposto è comunque ipotizzabile data la presenza di blocchi a mare che testimoniano la capacità dei massi di percorrere distanze considerevoli.

Si può osservare inoltre in figura 4.10 come, rispetto al metodo regionale, si abbia una riduzione dell'estensione delle aree di invasione, derivante dall'affinamento del metodo.

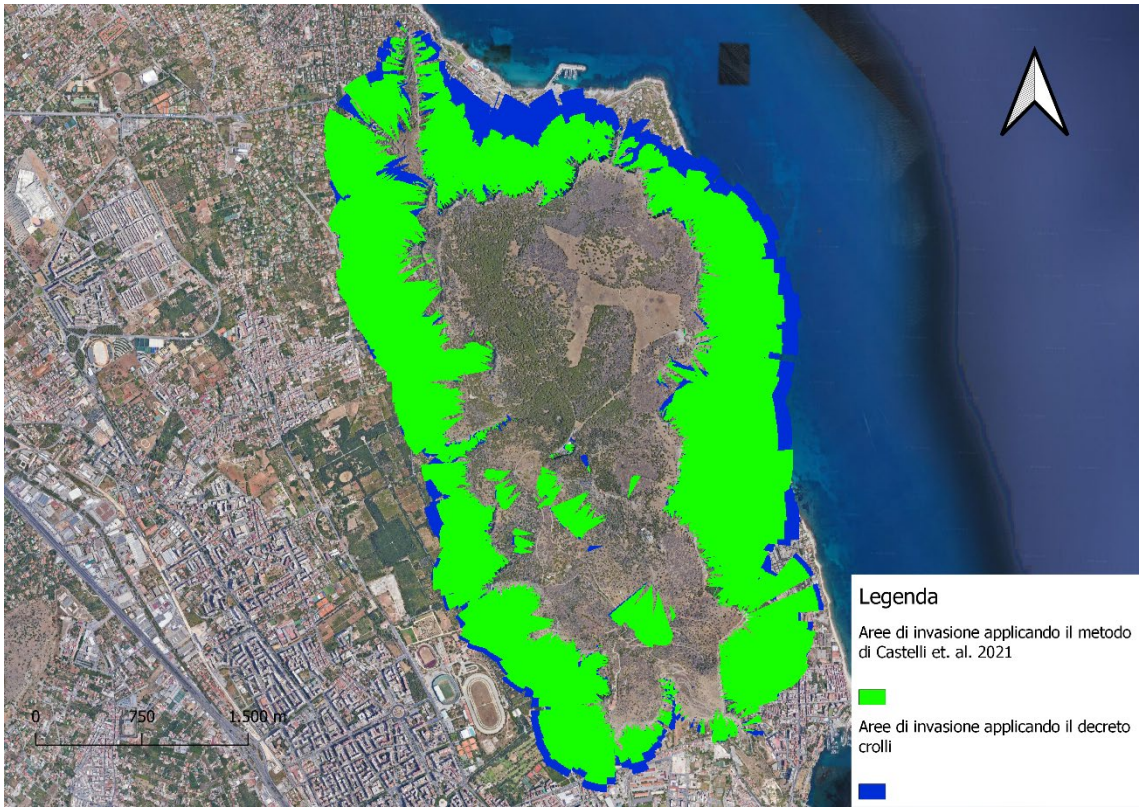

Figura 4.10 – Confronto delle aree di invasione ottenute seguendo il decreto crolli e quelle ottenute secondo il metodo di Castelli et. al. 2021.

La mappa di suscettibilità, seppur di fondamentale importanza per conoscere i punti che possono essere interessati dal fenomeno con probabilità maggiori, non può essere utilizzata per la valutazione della pericolosità. Quest'ultima dipende infatti anche da altri fattori, quali le caratteristiche del blocco in termini di massa, dalla velocità di passaggio e quindi dell'energia cinetica.

A tal fine l'output raster w_tot_{en}, calcolato come sommatoria dell'energia cinetica dei blocchi passanti per l'i-esima cella, pesata sulla propensione al distacco ID, può essere utilizzato come indicatore di pericolosità non temporale.

$$w_tot_{en} = \sum[ID \cdot E_i(x, y)] \qquad (4.1)$$

Tramite questo parametro si tiene quindi conto di tutti i blocchi passanti per l'i-esima cella e dalla propensione al distacco del punto sorgente da cui avviene il distacco, avendo così un quadro completo del fenomeno.

L'implementazione in ambiente Gis del metodo dei coni con il plug-in QProto consente pertanto di aggiungere un elemento di fondamentale importanza quale quello della definizione della pericolosità da caduta massi attraverso due soli parametri, l'angolo di inclinazione φ del cono ed il volume del blocco [m^3].

Si riporta in figura 4.11 la variazione per ogni cella di w_tot_{en}.

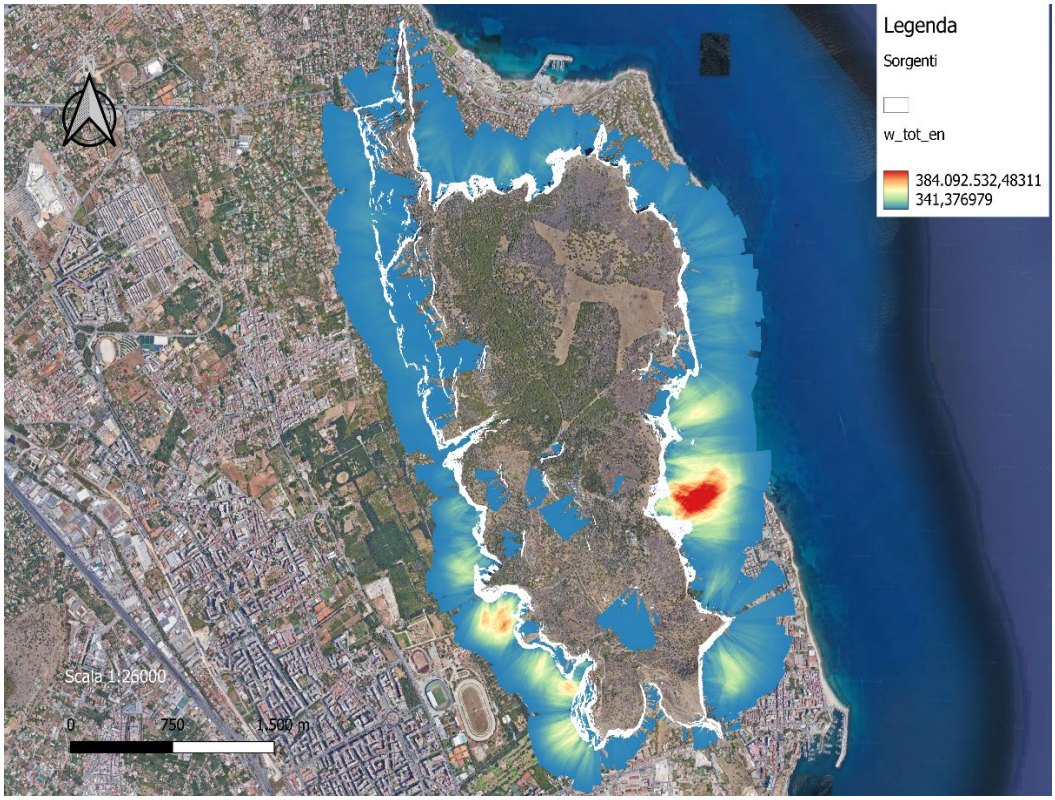

Figura 4.11 – Energia cinetica totale pesata sulla propensione al distacco DI ottenuta mediante QProto.

L'area a pericolosità maggiore è quella alla base del versante Sud-Est, in prossimità del cimitero di Santa Maria dei Rotoli. Altre zone di attenzione si possono osservare nei pressi del circolo sportivo di Palermo, lungo il versante Sud-Ovest mentre le altre porzioni di territorio, date le caratteristiche dei versanti, contraddistinti da dislivelli meno significativi, presentano valori di w_tot_{en} minori. È da segnalare inoltre come le aree a pericolosità maggiore siano anche quelle in cui si ha la propagazione dei blocchi di volume maggiore (5 m^3, peso specifico =2,5 t/m^3). L'output può essere interpretato come una mappa della pericolosità da caduta massi non dipendente dal tempo, la quale permette di definire le zone in cui delle analisi più di dettaglio sono necessarie.

Infine, si riporta in figura 4.12 la mappa dell'energia cinetica media, in J, che sarà utilizzata nel Capitolo 5 per la valutazione della vulnerabilità fisica degli edifici e delle strade.

Figura 4.12 – Energia cinetica media [J], utile per la valutazione della vulnerabilità V fisica degli elementi esposti (edifici e strade).

4.5 Considerazioni sui risultati

L'analisi della propagazione dei blocchi tramite QProto ha consentito la valutazione delle aree a pericolosità (non temporale) maggiore, dato che sarà quindi utilizzato nella successiva analisi di rischio. A differenza dello studio proposto nel capitolo 3 è stata in questo caso valutata e poi classificata qualitativamente per ogni punto sorgente la propensione al distacco ID, tramite l'osservazione dello stato di alterazione, della fratturazione e della morfologia del versante. Tramite ID è quindi possibile individuare le regioni che hanno una probabilità maggiore di generare fenomeni di caduta massi.

I risultati ottenuti mediante l'applicazione della metodologia proposta da Castelli et. al 2021 (figura 4.9), sono stati confrontati con le mappe di pericolosità proposte dal P.A.I. della Regione Sicilia, ottenendo aree di propagazione più ampie. L'applicazione di metodi empirici alla media scala porta con sé una serie di incertezze poiché tutte le caratteristiche del fenomeno vengono racchiuse all'interno di un unico parametro, l'angolo di inclinazione del cono φ. Una piccola variazione di tale grandezza si ripercuote in modo consistente sui risultati. Inoltre, i metodi empirici non riescono a tener conto di eventuali ostacoli presenti sulla superficie, quali edifici-infrastrutture, o delle variazioni puntuali delle caratteristiche del versante, che possono portare ad un'ulteriore riduzione delle aree di invasione.

In aggiunta, lo studio è stato condotto considerando per molti settori l'assenza di vegetazione, condizione verificatasi solamente a seguito del 2016 e ciò può portare alla sovrastima delle aree di invasione.

Considerando tuttavia che la valutazione del rischio su porzioni di territorio di grande estensione fornisca in genere risultati a favore di sicurezza, l'analisi può essere considerata valida.

Il valore massimo di energia è difatti circa 37000 kJ nella zona sottostante una parete sub-verticale (zona cimitero Santa Maria dei Rotoli), compatibile con la caduta di un blocco di volume 5 m^3 e un dislivello di più di 200 m in 30 m.

Capitolo 5

Analisi di rischio da caduta massi

5.1 Concetto di rischio

Il concetto di rischio è stato sviluppato per l'analisi e per la valutazione di problemi di sicurezza complessi e la conseguente pianificazione delle misure di mitigazione. Da un punto di vista generale il rischio definisce la probabilità che un evento di una certa intensità produca effetti indesiderati sugli elementi esposti.

Data la rapida ed imprevedibile evoluzione dei fenomeni di caduta massi, la valutazione preliminare del rischio è la base di partenza per la pianificazione territoriale, concetto cardine per ridurne gli effetti sul patrimonio (pubblico e privato) e le persone. Quando zone antropizzate si sviluppano in territori suscettibili ad eventi di questo tipo occorre analizzare la possibilità di perdite economiche, fisiche e sociali (Peila et. al. 2020). La valutazione del rischio, oltre che individuare le aree maggiormente esposte, permette di avere informazioni qualitative o quantitative per scegliere le metodologie di protezione/prevenzione più appropriate.

Essa risulta spesso molto complicata a causa della correlazione spazio-temporale di tanti fattori che sono imprevedibili e si esegue combinando diverse componenti mediante relazioni matematiche adeguate. Numerose metodologie di analisi di rischio sono state proposte e sono disponibili in letteratura e nello specifico nel presente capitolo verrà applicato il metodo IMIRILAND (Castelli et. al. 2004).

5.2 Definizioni e terminologia

Essendo quella del rischio una materia molto complessa, che può essere applicata in numerosi ambiti e di fondamentale importanza, si rende necessaria una terminologia univoca al fine di ridurre al minimo le incertezze. Nel linguaggio comune si utilizzano spesso in modo inappropriato i termini pericolosità, suscettibilità, rischio, assumendo significati differenti. A tal fine si riportano delle definizioni di riferimento della terminologia che sarà successivamente utilizzata (Barbero 2022).

Intensità: misura dei parametri geometrici e/o meccanici correlati al potenziale distruttivo di una frana. Questi parametri possono essere descritti qualitativamente o quantitativamente e possono includere elementi quali velocità, distanze percorse, energia cinetica, volume.

Tempo di ritorno: intervallo di tempo medio che intercorre tra due eventi di eguale intensità in una specifica area.

Suscettibilità: probabilità che in una determinata area si verifichi un evento naturale pericoloso (probabilità spaziale, senza alcun riferimento al periodo di ritorno).

Pericolosità (H): probabilità che un evento F, di data intensità, si verifichi in una data area ed in un dato intervallo di tempo (se la probabilità temporale non è considerata, si parla di pericolosità relativa).

Elementi a rischio (E1): popolazione, edifici, opere di ingegneria, infrastrutture, beni ambientali, economici, storici e culturali che ricadono in aree colpite dall'evento.

Esposizione (E): probabilità che gli elementi siano esposti ad una potenziale perdita quando un fenomeno, di una data intensità, che accade in una data area e un intervallo di tempo, ovvero E=p(E1=x,y,z,t).

Vulnerabilità(V): grado di perdita per un dato elemento esposto ad un fenomeno di caduta massi di una data intensità. È spesso espressa in una scala da 0 (nessuna perdita) ad 1 (perdita totale). È correlata sia all'elemento stesso che all'evento.

Valore degli elementi esposti (W): valore in termini monetari o a indice. E' utile distinguere tra:

- valore fisico;
- valore economico;
- valore sociale;
- valore ambientale.

Danno (D): definito come il prodotto tra la vulnerabilità ed il valore quindi D=VxW.

Rischio totale (R): probabilità che un evento, di una data intensità, in una data area e intervallo di tempo, produca un danno agli elementi esposti.

$$R = H \times V \times W \times E = H \times D \times E \qquad (5.1)$$

Nel caso di elementi statici il rischio si riduce al prodotto tra la pericolosità e il danno.

Rischio residuo: livello di rischio rimanente nonostante gli interventi di mitigazione.

Variazione del rischio: esprime la variazione del livello di rischio a seguito di opere di mitigazione o di variazioni delle condizioni in sito.

Rischio accettabile: un livello di rischio che la società è disposta ad accettare. Ulteriori azioni per la mitigazione non sono solitamente richieste. Tale valore è soggettivo e funzione dei parametri socio-economici.

Analisi di rischio: utilizzo delle informazioni disponibili al fine di stimare il rischio per la popolazione, proprietà, ambiente, derivante dai pericoli presenti.

Gestione del rischio: insieme di interventi, politiche, pratiche e procedure finalizzate alla mitigazione ed al monitoraggio del rischio.

Interventi di prevenzione: serie di interventi che riducono la probabilità di accadimento dell'evento pericoloso temuto.

Interventi di protezione: azioni che non influiscono sulla probabilità di accadimento dell'evento ma esplicano la loro funzione di mitigazione del rischio tramite una riduzione del danno atteso.

5.3 Valutazione del rischio

La procedura per la valutazione del rischio viene tipicamente standardizzata al fine di avere una linea guida da seguire durante le varie fasi dello studio. Possono essere individuati 7 punti, a cui aggiungerne un successivo per gli interventi di mitigazione.

1) Identificazione del pericolo.
2) Definizione di uno o più scenari.
3) Analisi di pericolosità.
4) Valutazione degli elementi a rischio.
5) Definizione del valore degli elementi a rischio.
6) Valutazione della vulnerabilità degli elementi a rischio.
7) Stima del rischio.
8) Interventi di mitigazione.

(Barbero, 2022)

5.3.1 Identificazione del pericolo e definizione degli scenari

Il pericolo è il più probabile scenario di instabilità che può avvenire nel sito di analisi. L'individuazione della tipologia di instabilità richiede: informazioni su eventi passati, inventari di frane, informazioni sulle caratteristiche geologiche, geomeccaniche e geomorfologiche del sito e la conoscenza dei fattori che controllano il fenomeno.

5.3.2 Analisi di pericolosità

Una volta definiti la tipologia di evento e l'intensità iniziale, è necessario comprenderne la dinamica e l'evoluzione, andando così a valutare la pericolosità derivante dal manifestarsi del fenomeno. I metodi che vengono solitamente utilizzati possono essere di due tipologie, qualitativi o quantitativi e portano entrambi alla realizzazione di mappe di pericolosità.

I metodi qualitativi, basati ad esempio su analisi geomorfologiche in sito o sulla definizione di indici e mappe, risultano più facilmente comprensibili ed applicabili, portando ad una riduzione delle spese in termini economici e di tempo. Di contro, però, si basano su ipotesi soggettive e si ha una scarsa chiarezza nella distinzione delle zone a pericolosità maggiore.

I metodi quantitativi invece, quali analisi di propagazione tramite metodi semplificati, utilizzati in questa tesi, analisi statistiche o approcci geomeccanici, sono basati su grandezze oggettive e forniscono dei risultati più accurati. Come tutti i metodi più sofisticati risultano però più lunghi e complessi, necessitano di dati che a volte non sono disponibili e la loro accuratezza dipende molto dal metodo matematico utilizzato.

Nella definizione di pericolosità riportata precedentemente si fa riferimento alla probabilità di accadimento temporale dell'evento. Nell'ambito della presente tesi, poiché non si hanno informazioni sulla correlazione tra volume dei blocchi caduti e la ricorrenza temporale, non è stato possibile computare il periodo di ritorno.

L'affinamento dell'inventario dei crolli redatto dal Dipartimento di Protezione Civile di Palermo potrebbe in futuro consentire la creazione di una relazione statistica tra il tempo di ritorno il volume di riferimento. In letteratura sono disponibili alcuni approcci per

questo scopo. Ad esempio, De Biagi et al. 2017 adottando la Rockfall Block Size Distribution (RBSD) introdotta da Ruiz-Carulla et al. (2015) hanno sviluppato una metodologia per realizzare una legge volume-frequenza e calcolare così il volume di progetto da utilizzare per le analisi di pericolosità sulla base del tempo di ritorno e viceversa.

Tale metodo necessita la disponibilità di un catalogo degli eventi passati "C" e utilizza una raccolta di misure dei blocchi al piede "F". Ad ognuno dei due inventari, viene assegnato un modello probabilistico, una distribuzione di Poisson a C e una di Pareto Tipo 1 al catalogo F. Il volume v avente tempo di ritorno T viene definito come:

$$v(T) = V_T(\lambda T)^{\frac{1}{\alpha}} \qquad (5.2)$$

In cui V_T è un volume di riferimento (ad esempio il minimo volume osservato) e $\lambda \; e \; \alpha$ sono la frequenza annuale di accadimento e il parametro della distribuzione di riferimento.

5.3.3 Elementi esposti

Una volta valutata la pericolosità e l'evoluzione del fenomeno, sia in termini di aree di propagazione che di intensità (ad esempio energia cinetica), è necessario individuare tutti gli elementi a rischio presenti nell'area, quali persone, infrastrutture, edifici, beni ambientali, ed il rispettivo valore fisico, economico, sociale ed ambientale. L'applicazione della metodologia IMIRIALND consente di tener conto, se presenti, dei differenti valori degli elementi esposti considerati.

5.3.4 Valutazione della vulnerabilità

La vulnerabilità rappresenta il grado di perdita atteso per un dato elemento o un insieme di essi a seguito del verificarsi di uno scenario di una data intensità, in un'area e in un intervallo di tempo.

Al variare dello scenario, considerando il medesimo elemento a rischio, si ha quindi una variazione della vulnerabilità. Per la sua stima sono disponibili sia metodi qualitativi che quantitativi.

Ad esempio, Fell (1994) ha distinto tra vulnerabilità sociale, relativa alle persone coinvolte nel fenomeno franoso, e la vulnerabilità di strutture ed attività.

Castelli e Scavia (2008), nel lavoro per il progetto IMIRILAND, hanno identificato quattro categorie di vulnerabilità:

- fisica (strutture ed infrastrutture);
- economica (attività economiche);
- ambientale (relativa alla flora, alla fauna, ai beni storici ed architettonici);
- sociale (riferita alle persone).

Da un punto di vista quantitativo, la vulnerabilità è spesso espressa in una scala da 0 ad 1.

Essendo questo uno studio ad una scala piccola, quindi non di dettaglio, la valutazione della vulnerabilità deve essere effettuata utilizzando dei metodi semplificati. Generalmente un approccio basato sulla classificazione in base alla tipologia degli edifici è preferibile a questa scala di dettaglio e le strutture possono, ad esempio, essere raggruppate in aree omogenee o sulla base delle caratteristiche delle stesse, attribuendo un unico valore alla categoria.

Sono inoltre disponibili dei metodi che tengono conto, per una valutazione quantitativa, della tipologia di struttura, considerando tre modi di rottura:

- rottura per punzonamento;
- rottura per inarcamento;
- rottura flessionale.

Oltre ciò, si tiene conto anche della propagazione del danno all'interno dell'edificio, sulla base del numero di piani, dell'orientamento, dello stato di manutenzione, della geometria, distinguendo inoltre tra elementi strutturali e non strutturali. (Mensa 2021)

Questo metodo richiede però un'indagine in sito al fine di definire le caratteristiche degli edifici ed è applicabile esclusivamente per le abitazioni. Ove il numero e la tipologia degli edifici sia molto ampia, è difficile operare una caratterizzazione di dettaglio delle strutture alla piccola scala; in tal caso occorre utilizzare differenti metodologie di più semplice applicazione.

5.3.5 Valutazione del rischio

Come detto precedentemente il rischio viene definito come la combinazione degli elementi descritti attraverso un prodotto. Più precisamente esso viene calcolato come prodotto tra la probabilità spaziale e temporale H che avvenga l'evento potenzialmente dannoso, la vulnerabilità V, l'esposizione E ed il valore W degli elementi a rischio.

$$R = H \times E \times W \times V \qquad (5.3)$$

Tenendo presenti varie classi per ognuna delle componenti del prodotto è possibile rappresentare l'operazione tramite delle matrici (figura 5.1)

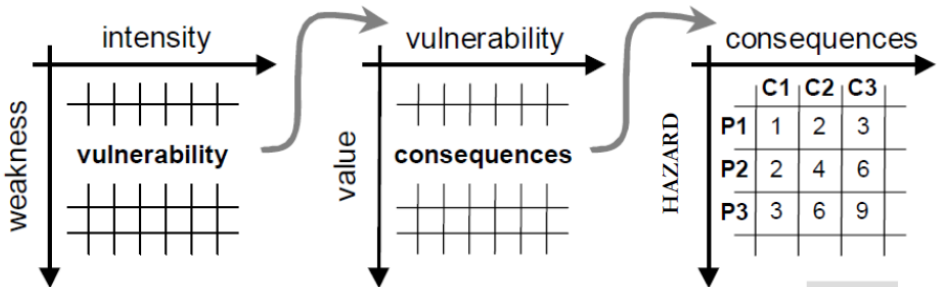

Figura 5.1 – Schema matriciale per il calcolo del rischio (Castelli et. al. 2004).

La valutazione di scenari differenti, relativi ad esempio a dei distacchi di massi con volumi variabili, porta a degli effetti diversi e di conseguenza anche a livelli differenti di rischio.

Nel caso in cui non si tenga conto del valore W degli elementi esposti si parla di *Rischio Specifico*, definito mediante la seguente relazione:

$$R_s = H \times E \times V \qquad (5.4)$$

Da cui risulta di conseguenza che

$$R = R_s \times V \qquad (5.5)$$

La valutazione del rischio non deve però essere fine a sé stessa ma deve rappresentare un supporto deciso all'individuazione di quelle aree in cui effettuare prioritariamente degli interventi per la mitigazione. Bisogna quindi comprendere se il valore ottenuto può essere considerato accettabile o meno. Date le numerose incertezze, sia dei parametri che vengono utilizzati, sia del metodo stesso con cui essi vengono ottenuti, sovente viene impiegato un approccio di tipo probabilistico, associando ad ogni elemento che costituisce il rischio una rispettiva distribuzione di probabilità.

Quello che si otterrà non sarà quindi un valore assoluto di rischio bensì una distribuzione di probabilità.

Secondo questa premessa è quindi possibile ricorrere alla rappresentazione riportata in figura 5.2

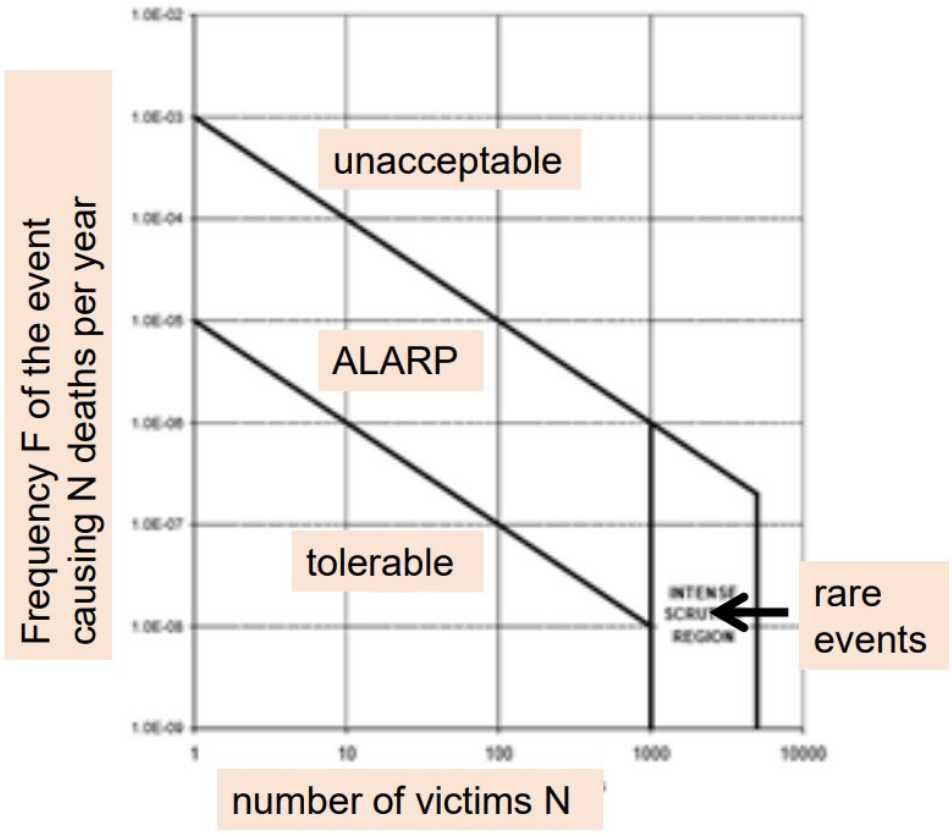

Figura 5.2 – Definizione di rischio tollerabile, rischio intollerabile e zona ALARP. (Barbero, 2022).

Due limiti molto importanti sono il Rischio Tollerabile ed il Rischio Accettabile, secondo i quali è possibile decidere se è necessario effettuare degli interventi per la gestione del rischio. Si riportano le definizioni dei due livelli di riferimento:

*rischio accettab*ile: si intende un livello di rischio che la società, per motivi di vita o di lavoro, ammette di accettare così com'è, indipendentemente dalla sua gestione (Lyle W. Zevenbergen 1997)

rischio tollerabile: è un livello di rischio con cui la società ammette di conviverci, convincendosi che sia sufficientemente basso in modo tale che il costo associato a qualsiasi strategia di mitigazione (opere ingegneristiche ad esempio) non sia giustificato e considerato necessario. Questo rischio però è non trascurabile e andrebbe ridotto (Lyle W. Zevenbergen 1997).

Dunque, quando il rischio è superiore al limite tollerabile si è nella zona di non accettabilità e di conseguenza è necessario ridurre il valore al di sotto di quel livello. Se ci si trova tra il rischio tollerabile e il rischio accettabile si è nella così detta zona ALARP (As Low As Reasonably Practicable) in cui sarebbe consigliato effettuare degli interventi di mitigazione se economicamente e praticamente sostenibili. La regione di massima cautela (Intense Scrutiny Region) è riferita ad eventi rari che possono causare la morte di molte persone. In questo caso, sono necessarie attente valutazioni.

Quando dai risultati dell'analisi si verifica che il rischio non è tollerabile si rendono necessarie degli interventi che possono essere sia di tipo ingegneristico che non ingegneristico (sito ISTAT):

- ingegneristiche: agiscono sulle caratteristiche del fenomeno e sugli elementi a rischio;
- non ingegneristiche: includono attività di pianificazione e gestione.

L'azione di mitigazione può essere esplicata principalmente attraverso due misure:

1) incremento del livello di tollerabilità: in questo modo non si interviene su nessuna delle componenti del rischio ma si accetta che gli elementi possano essere esposti tal quali, adottando delle misure che consentano di aumentare il livello di tollerabilità o accettabilità della popolazione;
2) riduzione del rischio: si interviene su uno o più degli elementi costituenti il rischio, al fine di ridurlo.

La diminuzione del rischio può essere attuata mediante:

- interventi sulla pericolosità (H), agendo sulle cause scatenanti o predisponenti del fenomeno o sull'evoluzione dello stesso, attraverso stabilizzazione dei blocchi o interventi nell'area di propagazione;
- interventi sulla vulnerabilità (V) mediante un incremento della resistenza degli elementi a rischio contro le azioni instabilizzanti che si generano a seguito dell'impatto;
- interventi sull'esposizione (E), riducendo ad esempio il tempo trascorso dalle persone nell'area esposta al rischio o interdicendo la zona (interruzione del traffico, segnali acustici, segnali luminosi);
- interventi sul valore (V), tipicamente cambi di destinazione d'uso di terreni e strutture.

Gli interventi di mitigazione devono però sempre tener conto di un rapporto costi-benefici, il quale deve essere favorevole per l'intera comunità.

5.4 Il metodo IMIRILAND

Il metodo IMIRILAND (nato nell'omonimo progetto europeo sostenuto dall'UE dal 1° marzo 2001 al 31 dicembre 2003) è una metodologia multidisciplinare finalizzata alla valutazione quantitativa del rischio (Quantitative Risk Assestment) correlato ai grandi fenomeni franosi e applicato anche alla caduta massi. La metodologia IMIRILAND (Impact of Large Landslides in the Mountain Environment: Identification and Mitigation of Risk) è stata utilizzata in alcuni siti delle Alpi e dei Pirenei ed ha permesso di quantificare il rischio attraverso l'interazione sistematica di tutti i fattori che caratterizzano la pericolosità connessa alle grandi frane e le relative conseguenze per l'uomo e l'ambiente. Oltre che per la stima del rischio, la QRA può essere utilizzata come struttura di base per l'analisi dell'efficacia tecnico-economica di diverse metodologie per la mitigazione del rischio stesso, consentendo un confronto tra le varie soluzioni. (Mensa 2021).

Cruden e Fell (1997) hanno correlato la QRA alle frane sulla base della prima definizione teorica data da Varnes (1984):

- analisi di pericolosità:
- identificazione degli elementi a rischio;
- analisi della vulnerabilità degli elementi;
- calcolo del rischio.

Secondo il metodo IMIRILAND si rendono necessarie delle azioni atte a migliorare principalmente due aspetti (Bonnard et. al. 2004):

- la raccolta dei dati: una raccolta sistematica dei dati disponibili, la loro analisi e l'organizzazione risulta fondamentale al fine di ottenere un'identificazione dei pericoli che sia corretta e permetta quindi una buona analisi di rischio;
- analisi di pericolosità: una buona metodologia può essere ottenuta solo da un approccio multidisciplinare tenendo in considerazione i risultati ottenuti da più discipline.

Sulla base di queste considerazioni, la procedura si può racchiudere nei seguenti 5 step: (Castelli et. al. 2004):

1) raccolta dei dati;
2) identificazione e caratterizzazione sulla base dei dati raccolti in sito;
3) analisi multidisciplinare per la definizione della pericolosità, tenendo conto delle condizioni geologiche, geomorfologiche, geomeccaniche;
4) analisi del danno (compresi la vulnerabilità e la stima del valore degli elementi esposti);
5) calcolo del rischio.

Per migliorare ulteriormente l'output dell'analisi è necessario prestare particolare attenzione alle varie componenti della pericolosità:

- caratterizzazione del pericolo: caratteristiche geostrutturali principali;
- aree di invasione;
- intensità;
- probabilità di accadimento.

Per la definizione del danno D bisogna per prima cosa identificare gli elementi a rischio e il loro valore, valutarne quantitativamente la vulnerabilità e stimare quindi il danno atteso. Gli elementi a rischio stessi sono classificati in quattro categorie:

- fisici: infrastrutture, materiali, costruzioni;
- economici: interruzione di attività produttive;
- ambientali: in termini di flora/fauna, beni storici e architettonici;
- sociali: persone direttamente coinvolte ed evacuate, infortunate, morte. (Castelli et. al. 2004).

Questa distinzione si rende necessaria poiché è difficile comparare il valore di elementi appartenenti a categorie differenti. Il valore può essere valutato in termini monetari (quando disponibile) oppure esprimendo la loro importanza relativa.

La vulnerabilità degli elementi a rischio dipende dalle caratteristiche dell'elemento stesso (ad esempio le sue proprietà di resistenza all'impatto) ma anche dall'intensità dell'evento. Per fenomeni di grande intensità si osserva un incremento della vulnerabilità e viceversa.

Possono essere utilizzati due approcci:

- il primo è basato sugli effetti dell'evento simulato sugli elementi a rischio, definendo classi di vulnerabilità partendo da 0 (nessuna perdita) fino ad una (perdita completa). Si potrebbero costruire anche delle così dette "curve di fragilità";
- il secondo è invece basato sull'intensità dell'evento in termini energetici.

In questo studio V viene valutata sulla base dell'energia del blocco.

Noti la vulnerabilità V ed il valore W si può calcolare il danno D come segue:

$$D = W \times V \qquad (5.6)$$

Seguendo infine il filo logico proposto in questo capitolo, combinando i vari aspetti di pericolosità H e danno D (talvolta definito come conseguenze C) è possibile definire il rischio derivante dai fenomeni di caduta massi per gli elementi esposti E secondo la relazione:

$$R_E = H \times D \qquad (5.7)$$

Lavorando in ambiente GIS ed avendo come base dei file raster, costituti da celle di dimensioni date, il rischio sarà calcolato come prodotto matriciale, generando un raster per ogni componente.

5.5 Applicazione del metodo al caso studio

In questo paragrafo verrà descritta nel dettaglio la metodologia utilizzata per la stima del rischio mediante l'applicazione del metodo IMIRILAND nell'area oggetto di studio, focalizzandosi su quattro aspetti:

- rischio fisico per gli edifici;
- rischio fisico per le infrastrutture viarie;
- rischio sociale per le persone all'interno degli immobili;
- rischio sociale per le persone sulla strada.

In linea con quanto previsto dal metodo IMIRILAND si scompone il rischio in più componenti, in questo caso sociale e fisica. Per carenza delle informazioni necessarie e vista la scala di studio, non si tratteranno le componenti economica ed ambientale.

5.5.1 Rischio fisico

Per la valutazione del rischio fisico, come primo passo è necessario individuare quali sono gli edifici e le strade nell'area di studio. Per fare ciò sono stati utilizzati i dati, in formato shapefile, della CTR della Regione Sicilia aggiornati al 2021, disponibili sul portale del Sistema Informativo Territoriale Regionale (SITR). Gli elementi sono corredati da informazioni di massima relative alla tipologia di edificio -in genere in termini di utilizzo- e della tipologia di strada (sentieri, asfaltate, non asfaltate…)- utili alla definizione del valore fisico W. Ad ogni elemento è stato quindi assegnato un valore compreso tra 0 ed 1 come segue (Torsello et. al. 2022):

Tabella 5.1 – Valore fisico degli elementi esposti (Torsello et. al. 2022).

Elemento esposto	W fisico [-]
Chiese	1
Scuole	0.8
Servizi pubblici	0.8
B&B e alberghi	0.8
Edifici commerciali	0.8
Strutture di ristorazione	0.8
Case	0.6
Strade principali	0.6
Sentieri turistici	0.6
Strade secondarie	0.4
Tettoie	0.4
Baracche	0.4

L’esposizione viene considerata variabile in base alla posizione ed al grado di protezione dell’edificio/infrastrutture. Si considera infatti che gli edifici più a monte possano assolvere al ruolo di barriere fisica nei confronti di ciò che si trova più a valle. Data l’alta densità di edifici che caratterizza il caso studio, il metodo è stato adattato come segue:

E=1 per edifici esposti direttamente al fenomeno;

E=0 per edifici protetti da una fila di altri immobili;

E=0.25 per edifici protetti da due o più file di altri immobili;

All’aumentare della distanza dalla zona sorgente è infatti possibile osservare una mitigazione del fenomeno. Gli impatti con gli ostacoli presenti lungo il percorso portano ad una riduzione dell’energia del blocco fino possibilmente ad arrestarlo, riducendo quindi drasticamente l’esposizione degli elementi posti a distanze maggiori.

La procedura per la valutazione della vulnerabilità fisica V è invece differente per gli edifici e per le strade. Per i primi si utilizza la relazione empirica definita da Agliardi et. al. 2009 a seguito di studi su eventi avvenuti nel Comune di Fiumelatte in provincia di Lecco, i quali hanno determinato che:

$$V = 1 - \frac{1.358}{1+e^{\frac{E129000}{120300}}} \qquad (5.8)$$

In cui E è l’energia del blocco in J. È utile sottolineare come il contesto urbano di Palermo è differente da quello di Fiumelatte e caratterizzato da edifici in muratura e in calcestruzzo armato. In assenza però di ulteriori informazioni, la scelta dell’applicazione della relazione 5.8 pone in una condizione a favore di sicurezza e quindi in linea con i principi dei metodi ad una bassa scala di dettaglio.

Le classi di vulnerabilità risultano come indicato in tabella 5.2:

Tabella 5.2 – Vulnerabilità fisica degli edifici (Agliardi et. al. 2019).

Energia [kJ]	V [-]
<50	0
50-150	0.25
150-250	0.5
250-400	0.75
400	1

Sebbene la vulnerabilità dipenda, oltre che dalla magnitudo dell'evento, anche dalla tipologia di edifici, dai materiali, dallo stato di conservazione, dal numero di piani e da tutte le caratteristiche strutturali, a questa scala di studio non è possibile entrare nel merito inquanto gli edifici da dover analizzare sono 1157. Sarebbe quindi impensabile effettuare un sopralluogo per ognuno di essi finalizzato alla definizione delle sue proprietà e di conseguenza si assume un'omogeneità degli stessi con conseguenza che la V dipende dall'intensità del fenomeno (in termini di energia media).

Per la determinazione della vulnerabilità delle strade è stata invece stimata la penetrazione di un masso sul manto stradale utilizzando un approccio pseudo-statico.

Secondo la teoria di Labiouse et. al. (1996), derivante da prove su gallerie paramassi, è possibile calcolare la forza trasmessa alla struttura a seguito dell'impatto del blocco secondo la relazione:

$$F = 1.765 \times M_E^{\frac{2}{5}} \times R^{\frac{1}{5}} \times (0.8E_{cin})^{3/5} \qquad (5.9)$$

In cui R è il raggio della sfera equivalente al volume del blocco ed M_E il modulo elastico del materiale impattato. Non avendo informazioni relative allo stato di conservazione del manto stradale si è assunto cautelativamente M_E=1 GPa ma i risultati ottenuti in termini di profondità di impronta non variano significativamente al variare di tale valore.

Avendo utilizzato dei volumi variabili nell'analisi delle aree di invasione, non è possibile individuare un unico valore del raggio della sfera equivalente che impatta al suolo, di conseguenza si assume un valore medio relativo ad un volume V=2.75 m^3.

Il rischio fisico specifico si ottiene quindi come:

$$R_{fs} = E_f \times V_f \times W_f \qquad (5.10)$$

In figura 5.3 si riporta la mappa di dettaglio qualitativa del rischio fisico per gli edifici e la viabilità.

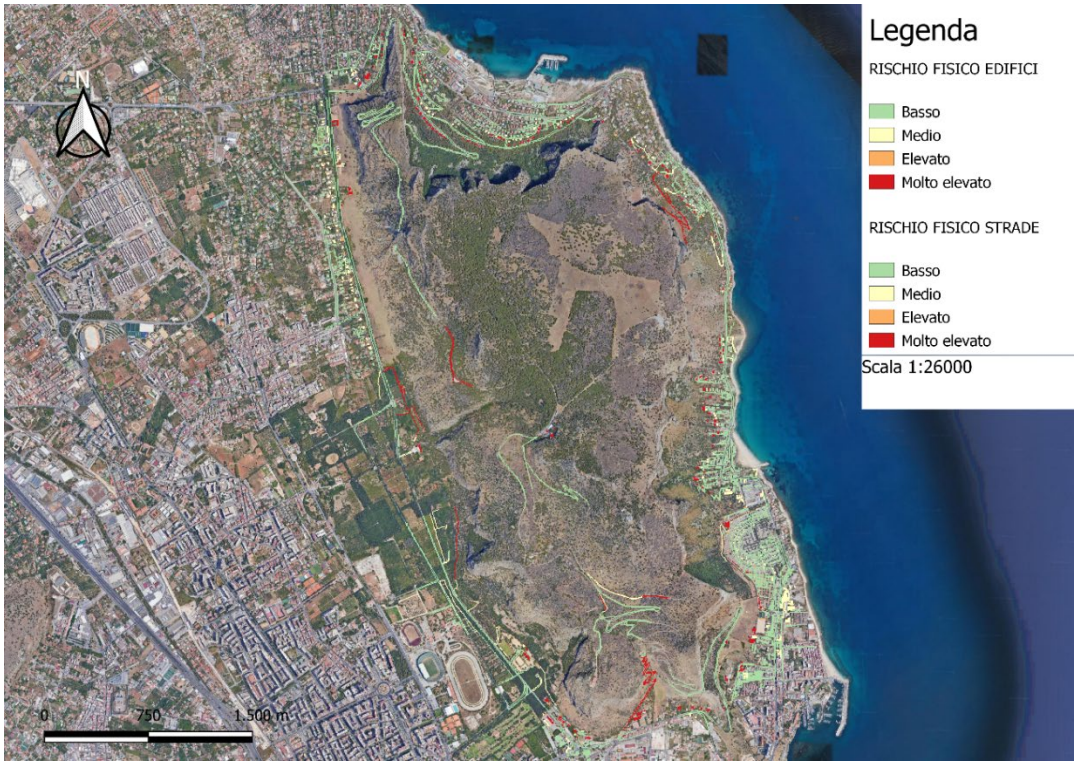

Figura 5.3 – Rischio specifico fisico per gli edifici e le vie di comunicazione ottenuto mediante l'applicazione del metodo IMIRALND.

5.5.2 Rischio sociale

Il rischio sociale esprime la probabilità che un evento pericoloso causi un danno ad una persona, che sia esso un infortunio, un danno psicologico dovuto ad esempio all'evacuazione o alla consapevolezza di abitare in un'area a rischio o la morte.

Considerando che affinché ci siano delle conseguenze su coloro che si trovano all'interno di un edificio è necessario che l'edificio stesso subisca un danno, è ragionevole derivare la vulnerabilità sociale da quella fisica. Per dare maggior importanza alla presenza delle persone, si incrementa la V fisica di una classe: ad esempio, per gli edifici caratterizzati da V_{fisica}=0.25 si avrà $V_{sociale}$=0.5. Il range di variabilità è comunque compreso tra 0 e 1.

Anche W risente di un incremento. I valori scelti in questo lavoro sono correlati al caso studio, caratterizzato dalla presenza di numerose località turistiche (ad esempio Mondello), parchi pubblici, il santuario di Santa Rosalia. La valutazione tramite indici risente comunque della soggettività di chi li definisce e di conseguenza è affetta da incertezza.

Tabella 5.3 – Valore sociale per gli elementi esposti sulla base delle caratteristiche sito-specifiche.

Elemento esposto	W [-]
Chiese	1
Scuole	1
Servizi pubblici	0.9
B&B e alberghi	0.9
Edifici commerciali	0.9
Strutture di ristorazione	0.9
Case	0.8
Strade principali	1
Sentieri turistici	1
Strade secondarie	0.8
Tettoie	0.6
Baracche	0.4

Infine è necessario definire l'esposizione sociale E che rappresenta la probabilità che una persona si trovi all'interno dell'elemento esposto e può essere derivata sulla base del numero di ore di occupazione giornaliere. Per le case si assume che sia presente sempre almeno una persona (E=1), per le scuole, B&B, alberghi, servizi di ristorazione ed edifici commerciali si fa invece riferimento all'orario lavorativo di 8 h/giorno (E=0.33). Un caso particolare è quello della chiesa di Santa Rosalia, meta di pellegrinaggio durante tutto l'anno. Per essa si può assumere la presenza di persone durante tutto il giorno ad eccezione delle ore notturne così come per i sentieri turistici (E=0.6).

Tabella 5.4 Esposizione sociale degli elementi esposti sulla base delle caratteristiche sito-specifiche.

Elemento esposto	E [-]
Chiese	0.6
Scuole	0.33
Servizi pubblici	0.3
B&B e alberghi	0.33
Edifici commerciali	0.33
Strutture di ristorazione	0.33
Case	1
Strade principali	0.6
Sentieri turistici	0.6
Strade secondarie	0.2
Tettoie	0.2
Baracche	0.1

Il rischio sociale specifico R_{ss} sarà quindi pari a:

$$R_{ss} = E_s \times V_s \times W_s$$

La mappa del R_{ss} è riportata in figura 5.4:

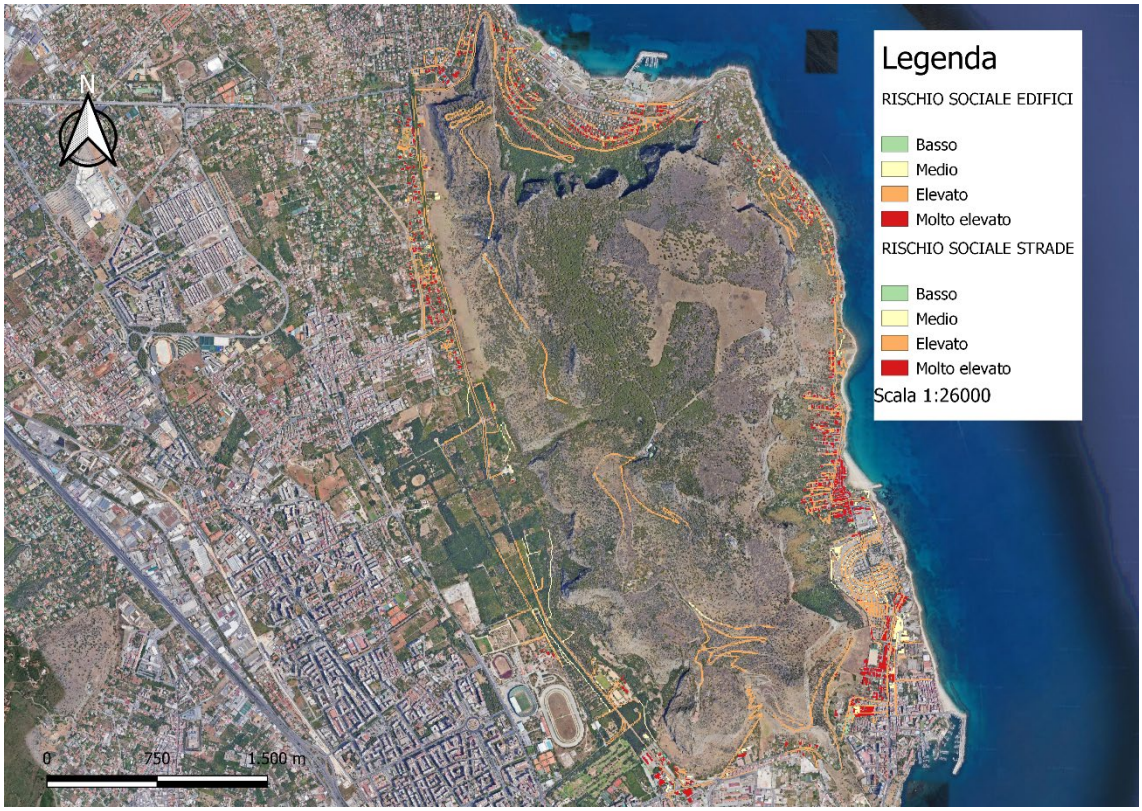

Figura 5.4 – Rischio specifico sociale per gli edifici e le vie di comunicazione ottenuto mediante l'applicazione del metodo IMIRALND.

5.5.3 Rischio specifico

Il rischio indipendente dalla probabilità temporale, quindi indipendente dalla probabilità temporale di accadimento, è funzione sia dalla componente sociale che di quella fisica. Per poterlo calcolare è stata effettuata la somma tra le due normalizzata ottenendo quanto rappresentato in figura 5.5:

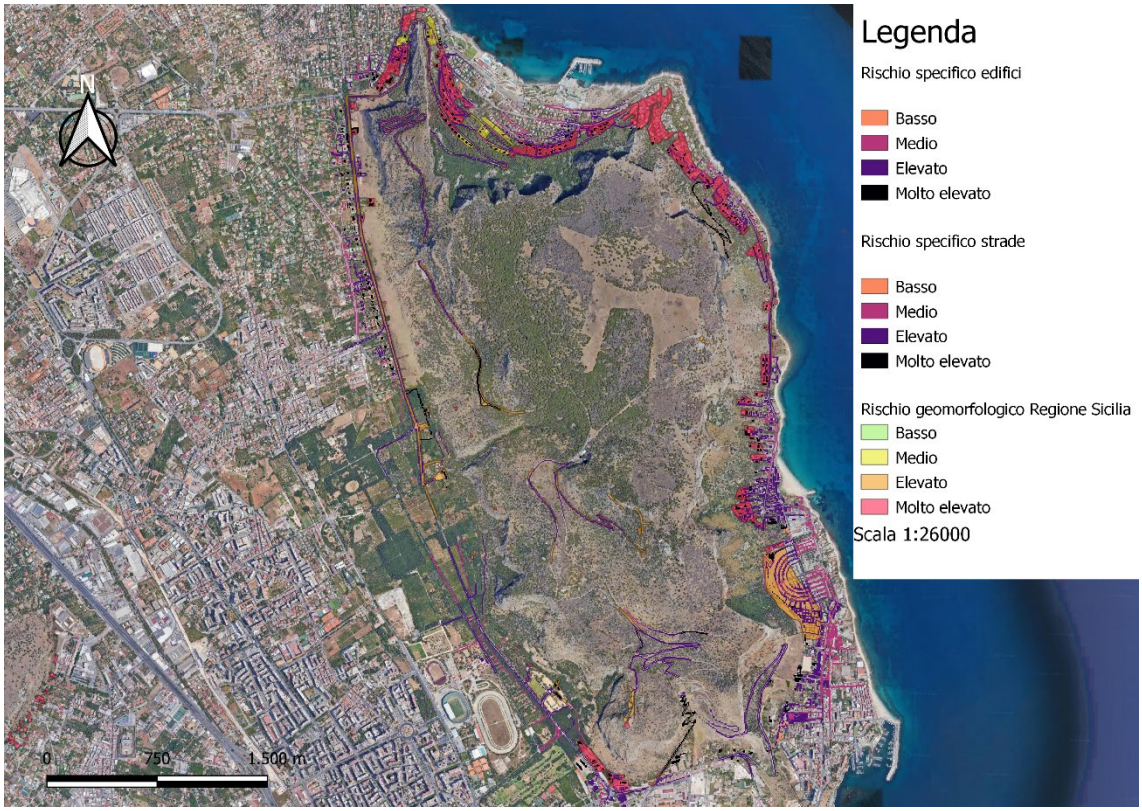

Figura 5.5– Rischio specifico per gli edifici e le vie di comunicazione ottenuto mediante l'applicazione del metodo IMIRALND e classi di rischio definite dal PAI della Regione Sicilia.

I risultati sono stati confrontati con le mappe di rischio geomorfologico fornite nel PAI della Regione Sicilia le quali riportano 4 livelli di rischio crescente da 1 a 4. Come si può osservare in figura 5.5 le aree a rischio maggiore indicate nel PAI sono sostanzialmente sovrapponibili con quelle ottenuta con l'applicazione del metodo IMIRILAND. Si nota però come in alcune porzioni di territorio si propone in questo studio una classe di rischio maggiore rispetto a quella riportata nel PAI stesso. Sebbene sia una condizione conservativa, d'altro canto la definizione di aree a rischio geomorfologico molto elevato comporta una serie di vincoli per la popolazione, di conseguenza potrebbero essere necessarie, per tali aree, delle analisi di maggior dettaglio. È importante inoltre sottolineare che l'utilizzo di QProto non consente di valutare l'effetto di mitigazione di

eventuali interventi presenti sul territorio e ciò ha delle ripercussioni anche sulla stima del rischio. Si può inoltre notare come siano stati classificati come a rischio alcuni elementi ricadenti in aree non delimitate dal PAI. A supporto dei risultati ottenuti si può consultare la mappa dei dissesti censiti dal Dipartimento di Protezione Civile di Palermo (figura 5.6).

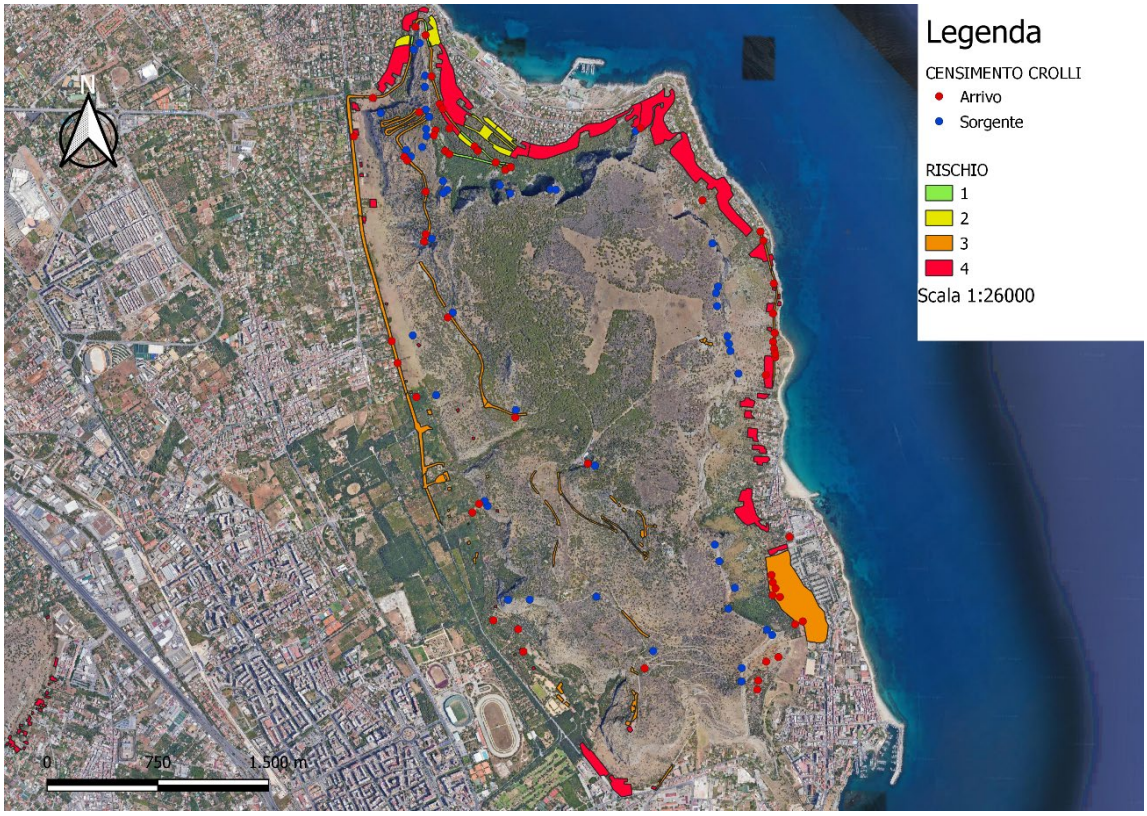

Figura 5.6– Crolli censiti dal Dipartimento di Protezione Civile di Palermo e classi di rischio definite dal PAI della Regione Sicilia.

Sovrapponendo i dati dell'inventario con la mappa di rischio si può osservare come in realtà si abbia evidenza storica, anche abbastanza recente considerando che il dataset è stato istituito nel 1998, di crolli in aree non mappate, quale ad esempio la zona del santuario di Santa Rosalia, che invece viene considerato come edificio a rischio

nell'analisi proposta, piuttosto che la porzione di territorio sottostante il versante sud. Considerato ciò, l'analisi di rischio proposta, con le dovute assunzioni e considerazioni sul grado di incertezza relativo alla scelta soggettiva di alcuni parametri e le scarse informazioni riguardanti le caratteristiche di resistenza degli elementi esposti, può essere considerata una valida integrazione alle informazioni già disponibili per il rischio geomorfologico dell'area di Monte Pellegrino.

Conclusioni

Lo scopo dello studio è stato quello di valutare il rischio da caduta massi nell'area urbana della città di Palermo, con particolare riferimento alla zona di Monte Pellegrino, storicamente caratterizzato da un'elevata propensione a generare tale tipologia di fenomeni.

A causa dell'elevata estensione della zona di indagine, l'analisi è stata condotta alla media/grande scala (1:10000), usando metodi speditivi per la valutazione quantitativa di tutte le componenti del rischio. Tutte le fasi di analisi sono state condotte con strumenti e metodologia open-source, create per fornire uno strumento aperto e condiviso ad amministrazioni pubbliche, professionisti e ricercatori per studi preliminari di pericolosità e di rischio sulla base dei dati disponibili. Tali analisi sono perciò da intendersi come utili ad evidenziare le zone più critiche, su cui concentrare l'attenzione e le risorse per studi di dettaglio finalizzati alla mitigazione del rischio, seguendo anche l'approccio a più fasi proposto dal P.A.I.

In linea con tale approccio, l'utilizzo del *plug-in* QProto (Castelli et. al. 2021), disponibile per il *software Opensource* Qgis, ha consentito di analizzare le aree di invasione, la velocità e l'energia cinetica utili a definire una mappa di suscettibilità e di pericolosità relativa (non temporale).

Il plug-in è basato sul metodo dei coni (Jaboyedoff e Labiouse 2011), che semplifica il complesso moto di caduta di un blocco lungo il pendio con uno scivolamento equivalente su un piano. L'inclinazione di tale piano rispetto all'orizzontale viene definito "angolo di

energia" φ_p ed è il principale parametro di analisi e deve essere rappresentativo di tutti i fattori che governano il fenomeno.

In letteratura sono riportate numerose indicazioni per la determinazione dell'angolo di energia φ_p; nell'ambito della presente analisi sono state utilizzate le correlazioni fornite nel recente lavoro di Castelli et. al. (2021) che consentono di ottenere tale parametro sulla base delle caratteristiche del versante, in termini di pendenza media, di vegetazione e del volume del blocco.

Per definire i volumi di progetto si è fatto riferimento agli studi di Cappadonia et.al. (2020) sui versanti di Monte Pellegrino, oltre che la consultazione dell'archivio dei crolli del Dipartimento di Protezione Civile del Comune di Palermo.

Nel luglio del 2022 è stato inoltre condotto un sopralluogo in sito, che ha consentito di valutare qualitativamente la dimensione dei blocchi potenzialmente instabili e lo stato di alterazione delle pareti rocciose lungo i diversi versanti.

Completata la fase di valutazione dei parametri è stata realizzata l'analisi di propagazione mediante QProto osservando come i risultati ottenuti fossero compatibili con le aree di pericolosità riportate nel PAI vigente della Regione Sicilia. Avendo applicato un metodo speditivo a media/grande scala, le aree ottenute hanno in alcuni porzioni di territorio un'estensione maggiore rispetto alle indicazioni del PAI, garantendo comunque una condizione a favore di sicurezza.

Per la valutazione del rischio è stato applicato il metodo IMIRILAND (Castelli et. al. 2004), ideato per lo studio del rischio indotto da grandi frane ma applicabile anche ai fenomeni di caduta massi.

Il metodo consente una valutazione quantitativa del rischio grazie a un approccio geografico e sequenziale, che prevede semplici calcoli tra mappe raster. Grazie alla sua implementazione in Qgis è stato perciò possibile produrre mappe di rischio specifico dell'area, a partire dai risultati ottenuti con il plug-in QProto.

Nello specifico sono state considerate due componenti, una fisica relativa agli edifici e alla viabilità e una sociale, la quale tiene invece conto della presenza delle persone. Al fine di ottenere una stima quantitativa dell'esposizione, del valore e della vulnerabilità sociale degli elementi esposti si è fatto riferimento al lavoro svolto da Torsello et.al. 2022, con un'opportuna taratura per tener conto delle condizioni sito-specifiche; la vulnerabilità fisica è invece stata valutata utilizzando l'approccio della forza statica equivalente di Labiouse (1996) e per le strade quello proposto da Agliardi et. al. 2009 per gli edifici. Per analisi di maggior dettaglio sarebbe necessario raccogliere informazioni sulle caratteristiche strutturali e di resistenza degli elementi esposti.

È stata quindi prodotta una mappa di rischio specifico, derivante dalla combinazione di rischio fisico e sociale e confrontata con quella proposta dal PAI, ritrovando una sostanziale coerenza, con alcune differenze in aree specifiche dovute al diverso approccio utilizzato. Nonostante ciò si nota comunque come le aree definite come ad elevato rischio dal piano lo siano tipicamente anche nella metodologia proposta non proponendo quindi una sottostima del rischio stesso.

Infine si può notare come, alcuni edifici e infrastrutture non segnalate nel PAI vengano invece riportate come a rischio nella mappa presentata. Per queste aree si ha però evidenza storica di eventi accaduti, anche in epoca recente.

In conclusione, sulla base dei risultati ottenuti, la metodologia sembra fornire risultati affidabili, anche in contesti differenti da quello alpino, nonostante sia possibile affinare ulteriormente il metodo per tener conto della pericolosità di contesti costieri.

Bibliografia

Agliardi, F.; Crosta, G.; Frattini, P., 2009, *Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci.

Alvioli Massimiliano, Guzzetti Fausto, Marchesini Ivan, 2020, *Parameter-free delineation of slope units and terrain subdivision of Italy*, Geomorphology, Volume 358,

Bar, N. & Nicoll, Sam & Pothitos, Frank., 2016, *Rock fall trajectory field testing, model simulations and considerations for steep slope design in hard rock.*

Barbero, Monica, 2022, *Corso di Analysis and design of geotechnical structures and earthworks*, Torino.

Bonnard Christophe, Forlati F, Scavia C, 2004, Fifth Framework Programme (European Commission). *Identification and mitigation of large landslide risks in Europe: advances in risk assessment*. A.A. Balkema.

Cafiso, Fabio & Cappadonia, Chiara, 2019, *Landslide inventory and rockfall risk assessment of a strategic urban area* (Palermo, Sicily).

Chiara Cappadonia, Fabio Cafiso, Riccardo Ferraro, Chiara Martinello & Edoardo Rotigliano, 2021, *Rockfall hazards of Mount Pellegrino area (Sicily, Southern Italy).*

Castelli, M.; Scavia, C., 2008, *A multidisciplinary methodology for hazard and risk assessment of rock avalanches.* Rock Mech. Rock Eng., 41, 3–36.

Castelli, Marta & Torsello, Giulia & Vallero, Gianmarco, 2021, *Preliminary Modeling of Rockfall Runout: Definition of the Input Parameters for the QGIS Plugin QPROTO*.

Castelli, Marta & Amatruda, G & Scavia, Claudio & Paro, Luca & Forlati, F., 2004, *The IMIRILAND methodology: a proposal for a multidisciplinary risk assessment procedure with respect to large landslide.*

Cruden, David., 1991, *A simple definition of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology.*

Cruden, D. & Fell, R. (eds.) 1997. *Landslide risk assessment; Proc. Int. Workshop, Honolulu.* Rotterdam: Balkema.

De Biagi, V.; Napoli, M.L.; Barbero, M.; Peila, D., 2017, *Estimation of the return period of rockfall blocks according to their size*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 17, 103–113.

Decreto legislativo n.152/06, Norme in materia ambientale

Evans, S.G.; Hungr, O., 1993, *The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes*. Can. Geotech. J., 30, 620–636.

Fell, R., 1994, *Landslide risk assessment and acceptable risk.* Can. Geotech. J. , 31, 261–272.

Giani, Gianpaolo.,1997, *Caduta di massi, analisi del moto ed opere di proiezione*, pp.34

Heim, H. Bergsturz und Menschenleben; Fretz & Wasmuth: Zwrich, Switzerland, 1932; p. 20.

Hungr, Oldrich & Leroueil, Serge & Picarelli, Luciano, 2014, *The Varnes classification of landslide types, an update*, pp.6.

Jaboyedoff M., 2003. *CONEFALL 1.0. User's guide*. Quanterra.

Jaboyedoff M. et Labiouse V., 2011. *Technical note: preliminary estimation of rockfall runout zones.* Natural Hazards and Earth System Science, Vol. 11, pp. 819-828.

Labiouse, Vincent & Descoeudres, François & Montani, Sara., 1996, *Experimental Study of Rock Sheds Impacted by Rock Blocks*. Structural Engineering International.

Lawrance A. Pierson. 1990, *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual*, pp 9-10.

Lied, K., 1997, *Rockfall Problems in Norway*; ISMES Publication: Bergamo, Italy; Volume 90, pp. 51–53.

Lyle W. Zevenbergen CRT, 1997, *Quantitative analysis of land surface topography.;12(1).*

McCauley, M.L., Works, B.W., Naramore, S.A., 1985, *Rockfall Mitigation, California Department of Transportation, Transportation Laboratory, Sacramento, California*.

Mensa 2021, *Analisi multi-rischio in un'area montana dell'Alta Valsesia.*

Onofri, R.; Candian, C., 2019, *Indagine Sui Limiti di Massima Invasione dei Blocchi Rocciosi Franati Durante il Sisma del Friuli del 1976*; CLUET: Regione Autonoma Friuli-Venezia-Giulia, Italy; p. 42.

PAI Regione Sicilia 2021, Capitolo 11-Norme di attuazione.

Pariseau W.G. and Voight B. 1979. *Rockslides and avalanches: basic principles and perspectives in the realm of civil and mining operations*. Rockslides and avalanches. Engineering sites. Elsevier, The Netherlands, pp. 1-92.

Peila, Daniele & Torsello, Giulia & Vallero, Gianmarco., 2020, *Evaluating Rockfall Risk: Some Critical Aspects.*

Ritchie A. M., 1963. *Evaluation of rockfall and its control. Highway Research Record*, Vol.17, pp. 13-28, Highway Research Board, Washington.

Ruiz-Carulla, R.; Corominas, J.; Mavrouli, O., 2015, *A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits*. Landslides, 12, 815–825.

Strategia <<Pericoli naturali>> Svizzera, *Attuazione del piano di azione PLANT 2005-2008,* Progetto A 1.1, Piano di gestione dei rischi per i pericoli naturali

Torsello, G., 2019, *La modellazione del fenomeno di caduta massi a piccola scala: valutazione dei parametri necessari per analisi speditive*. (Torino).

Torsello, Giulia & Vallero, Gianmarco & Milan, Lorenzo & Barbero, Monica & Castelli, Marta., 2022, *A Quick QGIS-Based Procedure to Preliminarily Define Time-Independent Rockfall Risk: The Case Study of Sorba Valley, Italy*.

Varnes, D. J., 1978, *Slope movement types and processes*. Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D.C., pp. 11-33.

Varnes, D.J. 1984. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. Natural Hazard, 3, Paris, France. UNESCO.

Sitografia

https://www.progettoiffi.isprambiente.it/

https://www.protezionecivile.gov.it/it/

https://www.protezionecivilesicilia.it/it/

https://www.sitr.regione.sicilia.it/pai/bacini.htm

https://protezionecivile.comune.palermo.it

https://geomorphology.irpi.cnr.it/tools/slope-units

http://extranet.regione.piemonte.it/imiriland/

https://www.istat.it/