

6. RISULTATI E CONSIDERAZIONI

L'elaborazione e la validazione del modello di suscettibilità consentono di ottenere due risultati principali. In primo luogo, sono state identificate con precisione le aree con maggiore probabilità d'essere coinvolte in dissesti futuri. Successivamente, è possibile investigare la relazione che esiste tra la combinazione di fattori più inclini al dissesto e la tettonica attiva del settore orientale dei Monti Peloritani.

L'idea consiste nel considerare che dietro i fattori che determinano le instabilità si nascondano la storia geologica passata e la tettonica recente dell'area. Queste hanno giocato, e giocano tutto'oggi, un ruolo fondamentale nel lento ma inesorabile processo di trasformazione della struttura morfologica di quest'area. Infatti, come visto nel paragrafo 3.3, la Sicilia orientale e la Calabria meridionale sono tra le aree tettonicamente più attive nell'intera regione del Mediterraneo.

Numerosi studi hanno esaminato, con approcci differenti, la relazione tra la tettonica e i processi superficiali in questa ed altre regioni (Burbank and Pinter, 1999 e citazioni ivi contenute; Montgomery and Brandon, 2002; Snyder et al., 2002 and 2003; Korup et al., 2007; Agliardi et al., 2009; Goswami et al., 2011), allo stesso modo si valuterà la possibilità di sfruttare l'analisi di suscettibilità come strumento per investigare il ruolo dell'attività tettonica sull'evoluzione del paesaggio.

6.1. Applicazioni e sviluppi

Il pericolo che deriva dagli effetti delle frane può causare severi danni alla popolazione e all'economia di estese porzioni di territorio. Gli eventi del 2007 e del 2009 nel territorio di Giampileri testimoniano che il dissesto diffuso non è un fenomeno raro, piuttosto si tratta di eventi che possono accadere nuovamente nel prossimo futuro.

L'analisi di suscettibilità geologica costituisce una tappa e uno strumento fondamentale per la conoscenza del territorio. Essa è un elemento strategico e propedeutico alle attività di programmazione in materia di difesa, protezione e gestione del suolo e del sottosuolo. La definizione della suscettibilità richiede un'attenta analisi dei fattori che determinano le condizioni di instabilità e le mutue interazioni fra questi.

Uno degli obiettivi di questo studio è stato quello di testare delle metodologie per la valutazione della suscettibilità capace di ottenere risultati soddisfacenti e che siano in grado di rispondere ad esigenze di pianificazione urbana e territoriale a livello locale.

I risultati, in particolare per la procedura SIM, mostrano che partendo da un modello molto accurato per una data area, anche se poco estesa, è possibile produrre una buona carta di suscettibilità per aree molto più vaste che condividono lo stesso assetto geologico, geomorfologico e topografico. Questi risultati sono frutto della precisione e dell'accuratezza sia del catalogo degli eventi franosi che dei rilievi sul terreno, e conseguentemente delle mappe dei fattori. L'attività di campagna ha permesso infatti di poter studiare i fenomeni, selezionare i fattori e mapparli con precisione. La zonazione della suscettibilità risulta quindi dettagliata e definita, utilizzabile concretamente in sede locale come supporto per le future scelte urbanistiche e di pianificazione territoriale. Un altro aspetto vantaggioso di questa procedura deriva dal risparmio, sia in termini di tempo che in termini economici, che deriva dal mappare e produrre il modello in un'area relativamente piccola ed estenderlo successivamente.

Esistono comunque metodologie più sofisticate per la zonazione della suscettibilità (vedi 2.3.1.). I metodi bivariati, infatti non forniscono indicazioni circa l'influenza relativa di ogni fattore che può essere stimata con tecniche di statistica multivariata. Con i metodi deterministici è possibile anche calcolare il fattore di sicurezza punto per punto, attraverso modelli idrologici e di rottura del terreno a scale ancora maggiori. In tutti questi casi, il presente studio può costituire un'ottima base di partenza, considerando anche il fatto che è stato creato un sistema di archiviazione ed elaborazione di dati su piattaforma G.I.S. per gestire in maniera integrata tutte le informazioni.

6.2. Implicazioni tettoniche

L'analisi di suscettibilità ha provato quali sono i fattori che incidono sui dissesti e qual è l'incidenza relativa di ogni classe. È così possibile individuare quali sono le combinazioni di fattori che rendono un versante maggiormente instabile.

Queste combinazioni consistono generalmente in litotipi scarsi o molto scarsi, soprattutto filladi (Unità Mandanici) e Paragneiss (Unità Aspromonte), ripidi pendii (35° - 45°) ricoperti dalla coltre colluviale o da altri depositi di materiale sciolto, lontano

dalla rete di drenaggio. Si proverà a guardare al verificarsi di queste combinazioni considerando l'eredità geologica e il quadro geodinamico dei Monti Peloritani (Fig. 6.1).

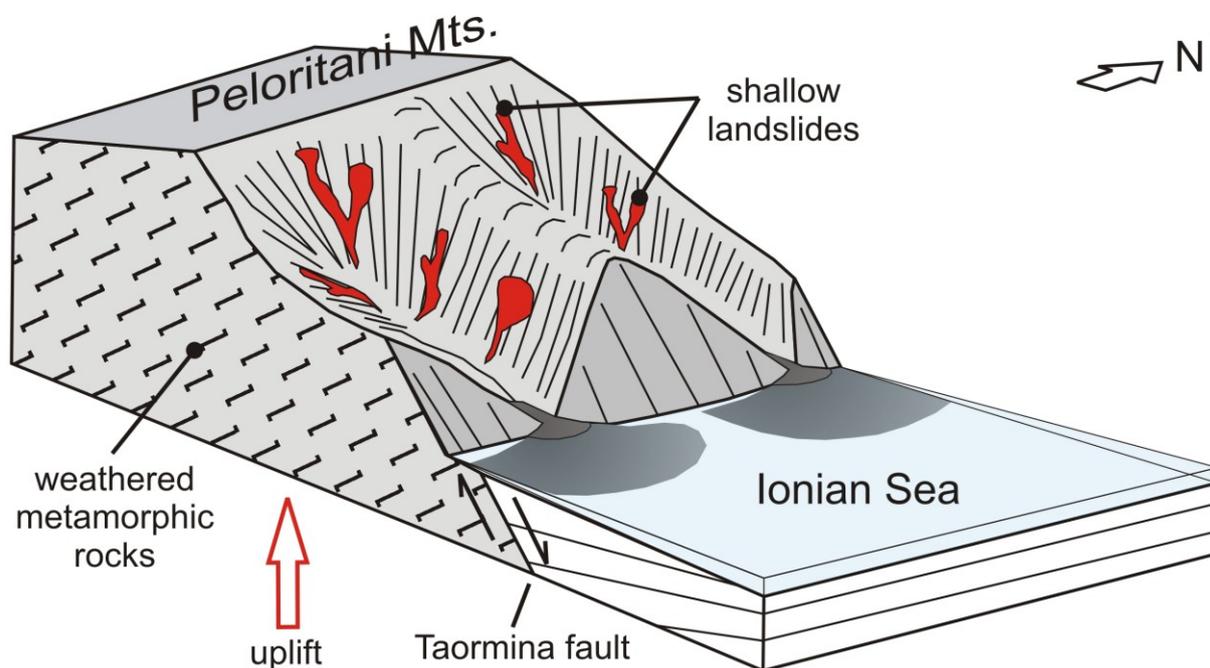


Fig. 6.1. Schema riassuntivo delle caratteristiche geologiche e dei processi morfologici e tettonici nei Monti Peloritani (da De Guidi & Scudero, *in press*).

L'intero settore Calabro-Peloritano è stato coinvolto in due cicli orogenici a partire dal Paleozoico superiore (vedi 3.1.). Più recentemente, a partire dal Pleistocene Medio, l'intero Arco Calabro è stato soggetto a un forte sollevamento regionale (Montenat et al., 1991; Westaway, 1993; Tortorici et al., 1995; Antonioli et al. 2006) che è stato accompagnato dall'instaurarsi del Rift Siculo-Calabro (SCRZ), attivatosi in questo settore circa 125 ka BP (Catalano et al., 2003). L'area studiata si trova al letto di un lungo segmento di faglia del SCRZ (Faglia di Taormina) (De Guidi et al., 2003; Neri et al., 2006; Catalano et al., 2008), ed è quindi soggetta ad un ulteriore sollevamento legato alla deformazione della struttura. Negli ultimi 125.000 anni il tasso di sollevamento medio è stato calcolato in 1,7 mm/anno (Catalano & De Guidi, 2003), ed è il più alto di tutta la Sicilia orientale per lo stesso intervallo temporale. I tassi di sollevamento per l'Olocene sono persino maggiori e i massimi registrati in tutta la penisola italiana (Lambeck et al., 2004). I valori di sollevamento sono compresi tra 1,4 e 2,4 mm/anno (Rust and Kershaw, 2000; Antonioli et al., 2003; De Guidi et al., 2003; Antonioli et al., 2009; Spampinato et al., 2012) ma tenendo conto che nello stesso periodo il livello del mare si è sollevato a sua volta di

circa 1,0 mm/anno (Lambeck et al., 2004), il sollevamento reale rispetto al livello di base (i.e. Mar Ionio) è minore; in ogni caso, il conseguente aumento del gradiente topografico in questo settore dei Peloritani è comunque notevole.

La deformazione tettonica verticale registrata negli ultimi 5000-6000 anni ha contribuito al ringiovanimento topografico del rilievo, innescando intensi processi erosivi (Cyr et al., 2010) e consentendo il rilascio del carico litostatico. Lo scarico delle tensioni favorisce la creazione negli ammassi rocciosi una fitta rete di discontinuità superficiali (unloading joint) (Dunne & Hancock, 1994; Waltham, 2002). Il processo di denudazione è favorito anche dalle condizioni geologiche: rocce metamorfiche facilmente alterabili e intensamente deformate (Morgagni et al., 1993; La Pera and Sorriso-Valvo, 2002; Snyder et al., 2003; Calcaterra and Parise, 2005; Marques et al., 2010; Goswami et al., 2011). Il rilascio litostatico e l'erosione si favoriscono reciprocamente, favorendo la degradazione (Riebe et al., 2001; Hren et al., 2007) e conseguentemente l'accelerazione dei processi di versante (Fig. 6.2), laddove la normale evoluzione del rilievo si esplica attraverso cicli più lenti di accumulo e mobilizzazione del materiale superficiale degradato (Fig. 6.3) (Dietrich et al., 1982; Burbank, 2002).

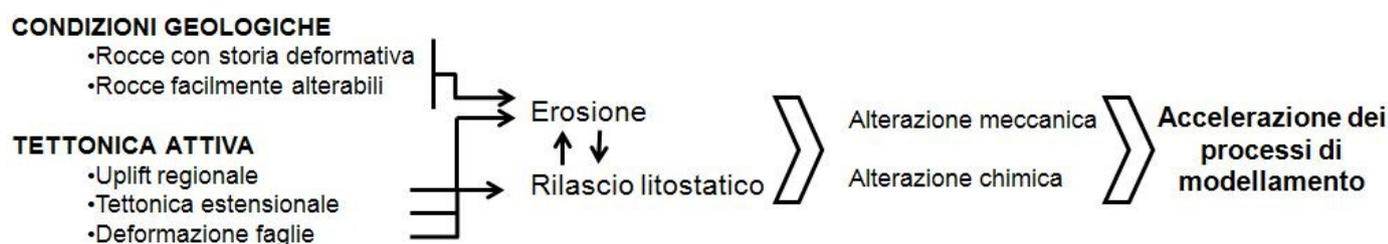


Fig.6.2. Diagramma delle relazioni tra i processi tettonici e processi superficiali.

In particolare, in una catena montuosa bordata da una faglia normale attiva (Fig. 3.3) il rilievo risponde molto velocemente ai cambiamenti del livello di base (Densmore et al., 1998; Goldsworthy and Jackson, 2000); in un periodo dell'ordine del secolo, o persino in minor tempo, il sistema fluviale è in grado di rispondere alla deformazione (Keller and Pinter, 1996).

Il sollevamento del blocco di letto tende a generare piccoli e ripidi bacini fluviali nei quali l'effetto della tettonica si riflette sia sullo stato di attività che sull'organizzazione di tutto il sistema fluviale (vedi anche paragrafo 3.7). Lungo il settore ionico dei Peloritani la faglia di Taormina controlla la linea di costa (Ghisetti,

1979; De Guidi et al., 2003; Neri et al., 2006) per un lungo tratto che comprende anche i bacini studiati. L'attività a lungo termine di questa struttura ha determinato la formazione di un reticolo di drenaggio di tipo conseguente; i corsi d'acqua principali nel tentativo di mantenere l'equilibrio, adeguandosi all'attività tettonica, erodono in maniera evidente il substrato. Il processo di erosione lineare tende ad attenuarsi verso monte e si riflette anche sulla morfologia dei versanti che tendono ad inclinazioni maggiori (Catalano and De Guidi, 2003; Goswami et al., 2012).

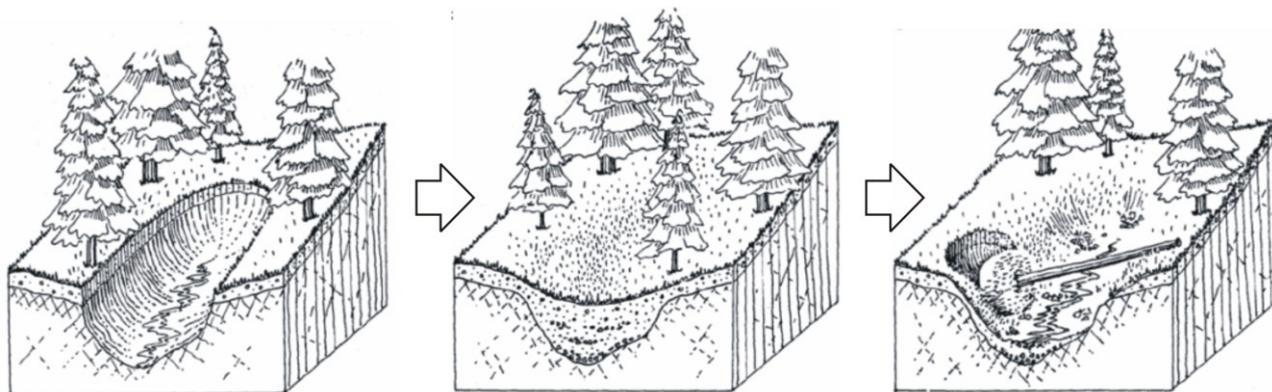


Fig.6.3. Evoluzione morfologica ciclica della depressione lasciata da una frana in un cuneo di materiale sciolto suscettibile nuovamente a mobilitazione. Modificato da Dietrich et al. (1982).

Tenendo in considerazione questi processi è possibile legare in maniera indiretta l'attività tettonica con i fattori geologico-ambientali quali la qualità degli ammassi rocciosi, l'esposizione, la pendenza e la distanza dal reticolo di drenaggio.

L'influenza dell'esposizione dei versanti sui dissesti non è quindi solamente connessa ai processi idrologici o di alterazione, ma può essere anche messa in relazione con l'organizzazione e l'evoluzione del rilievo. Infatti, i pesi più alti assegnati dall'analisi di suscettibilità sono associati ai versanti esposti a S e SW che sono quelli controllati dai segmenti fluviali del reticolo conseguente diretti ~WNW-ESE (Fig.6.4).

Allo stesso modo, il numero delle instabilità aumenta per distanze maggiori dai corsi d'acqua poiché i versanti che fanno capo al sistema conseguente sono generalmente più larghi (trasversalmente) e più lunghi (longitudinalmente). Questi versanti non sono interessati da questi fenomeni erosivi, permettendo l'accumulo di coltri più spesse di colluvium. Al contrario, in prossimità delle incisioni, il processo di accumulo di un sufficiente spessore di materiale è contrastato dalla maggiore efficienza del processo erosivo.

Anche altri autori affermano l'esistenza di una relazione tra la tettonica recente e la distribuzione delle frane nell'Arco Calabro e in questo settore in particolare. Tra questi, Goswami et al. (2011), provano, mediante l'analisi statistica area-frequenza, che i dissesti si concentrano maggiormente dove gli effetti, diretti o indiretti, delle faglie sono maggiori.

Queste considerazioni suggeriscono che l'influenza della tettonica, e la sua variazione nello spazio, nell'area dei Monti Peloritani debba essere presa in considerazione come fattore predisponente nei futuri studi di suscettibilità a piccola scala.

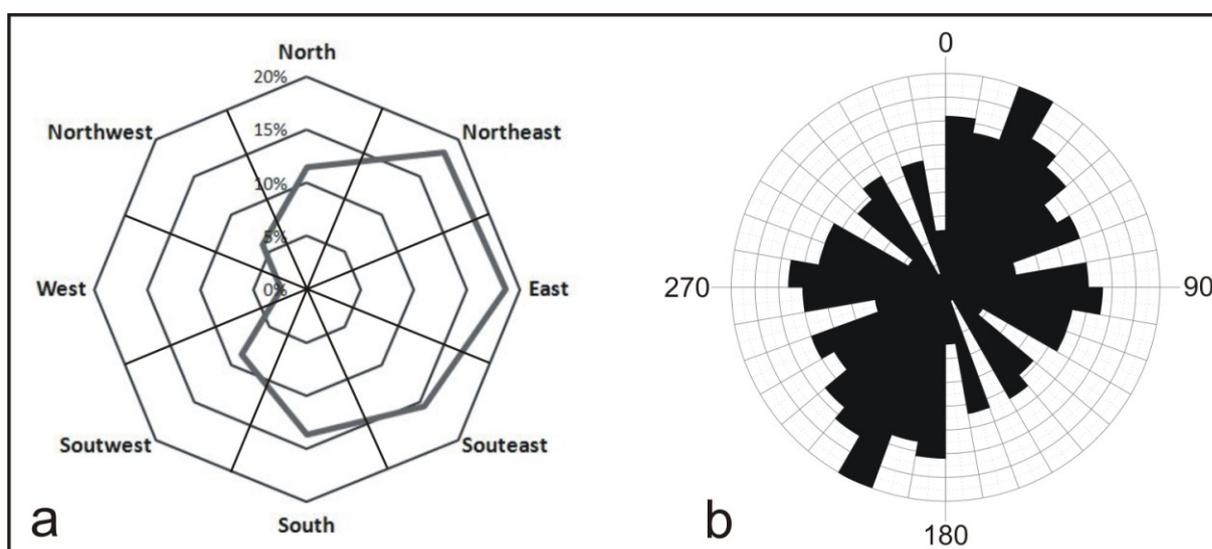


Fig.6.4. a) distribuzione di frequenza dell'esposizione dei versanti per l'area di *training* e le aree di *test*.; il valore più elevato è per i versanti esposti ad Est; valori relativamente alti sono associati anche a versanti esposti a Nord-Est e Sud. b) distribuzione di frequenza delle direzioni dei segmenti fluviali per l'area considerata; I segmenti orientati NNE-SSO e ONO-ESE sono i più frequenti (da De Guidi & Scudero, *in press*).

6.3. Valutazione della suscettibilità a scala regionale

Dimostrando l'influenza dei processi tettonici su quelli superficiali, è possibile proporre un modello che includa la variazione nello spazio di un "fattore tettonico". Questo tipo di approccio è una novità negli studi di suscettibilità a scala regionale (García-Rodríguez et al., 2008; Gullà et al., 2008; Wang et al., 2009; Ray & De Smedt, 2009) nei quali, eventualmente, l'unico fattore legato alla tettonica attiva è lo scuotimento al suolo conseguente all'attività sismica di strutture vicine (Miles & Keefer, 2009 e riferimenti ivi contenuti). Quest'ultimo è in realtà un fattore "innescante", pertanto non descrive l'effettiva propensione del territorio ai dissesti.

In questo studio si è invece considerata la variazione spaziale del sollevamento tettonico, che è il processo dominante; questo fattore vuole esprimere il “potenziale morfogenetico” che la deformazione verticale esercita sul territorio, seguendo le considerazioni esposte nel paragrafo 6.2.

6.3.1. Metodologia

L’approccio scelto per questa analisi è di tipo empirico (vedi 2.3.1.). Anche in questo caso sono selezionati dei fattori geologico-ambientali suddivisi in classi, a ciascuna delle quali è associato un “peso” crescente in funzione della sua influenza sui processi di versante.

I vantaggi di un modello empirico consistono nella possibilità di applicazione a qualsiasi scala e nella relativa rapidità nell’elaborazione che è dovuta alla quasi totale automazione delle operazioni in ambiente G.I.S. Il limite principale di questa metodologia è invece legato al grado di soggettività. Per ridurre al minimo gli effetti legati alla soggettività dell’operatore si è sfruttata la base di conoscenze dei modelli statistici già elaborati (Capitolo 5) e di un altro modello da letteratura sviluppato in parte dell’area. Inoltre prodotto finale può essere ulteriormente calibrato e affinato attraverso il confronto con un catalogo dei dissesti.

In dettaglio, l’iter di elaborazione del modello prevede:

- la scelta dei fattori geologico-ambientali;
- la suddivisione di ogni fattore in un adeguato numero di classi;
- l’attribuzione di un peso numerico alle classi;
- l’attribuzione di un peso numerico ad ogni fattore;
- la sovrapposizione e somma di tutte le mappe;
- la classificazione della mappa di LSI in classi qualitative.

L’area di elaborazione del modello racchiude tutto il versante orientale della catena dei Peloritani; è esclusa l’estremità nord-orientale (capo Peloro) caratterizzata dall’esclusiva presenza di depositi recenti e attuali, mentre è inclusa la parte più orientale del versante Tirrenico della catena, poiché geologicamente e geomorfologicamente affine al versante ionico; l’estensione complessiva è di ~430 km² (Fig. 6.5).

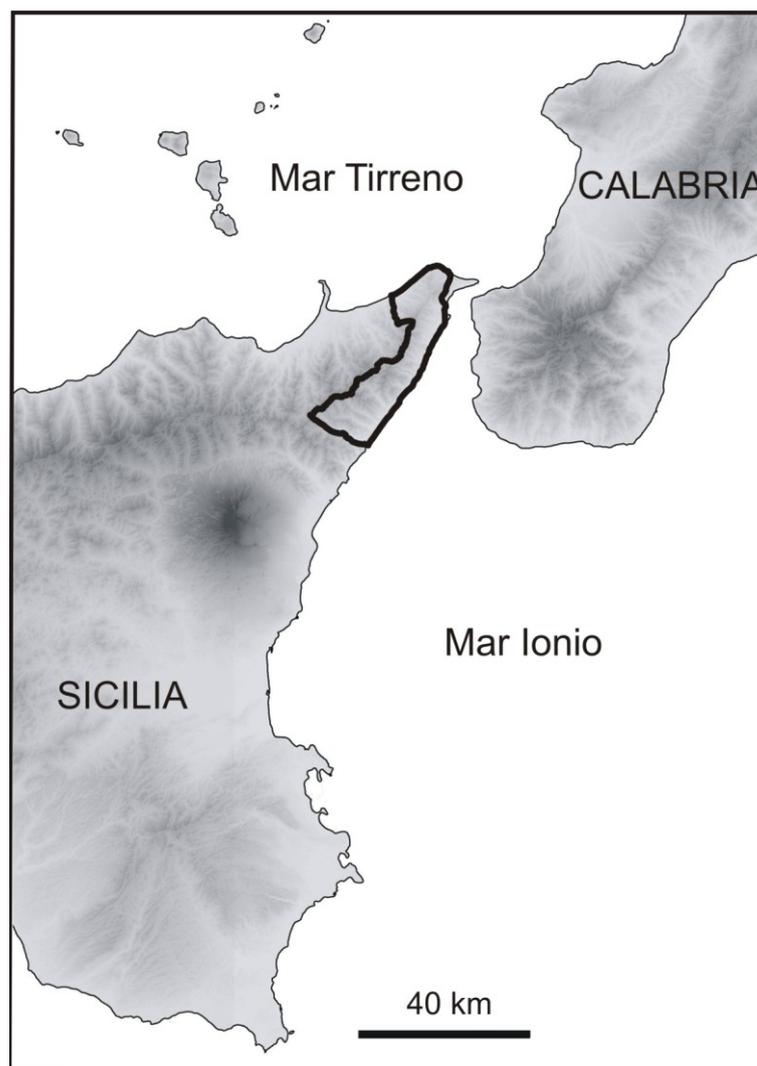


Fig. 6.5. Localizzazione dell'area di elaborazione del modello di suscettibilità a piccola scala.

6.3.2. Fattori

La scelta dei fattori ricalca in massima parte quella dell'elaborazione quantitativa. Sono considerate le caratteristiche generali dei litotipi affioranti; la base è costituita dalla Carta Geologica della Provincia di Messina (AA. VV., 2000). Le varie litologie sono raggruppate in classi qualitative che ne descrivono le caratteristiche generali: "loose deposits" (rocce sciolte); "soft rocks" (rocce tenere); "medium rocks" (rocce discrete); "hard rocks" (rocce resistenti). La suddivisione si basa sulle caratteristiche genetiche dei litotipi e sulla conoscenza diretta acquisita durante le attività sul terreno.

Classe I	"Loose deposits"	17%
	a alluvioni attuali e spiagge	
	ar alluvioni recenti e piane litorali	
	tf depositi fluviali terrazzati	
	tn depositi marini terrazzati	
	Qg sabbie, ghiaie e conglomerati fluvio-deltizi	
Classe II	"Soft Rocks"	11%
	Qgi conglomerati poligenici	
	P alternanza di sabbie e marne	
	Pi marne e calcari marnosi	
	Mg gessi e argille gessose	
	Maa mare argillose con intercalazioni di arenarie	
	Mac conglomerati poligenici	
	Mar alternanza di arenarie medio-grossolane e silt	
	AS argille varicolori	
	Omar alternanza argilloso-arenacea	
	Av metasiltiti	
	A carnirole gessifere	
Classe III	"Medium Rocks"	70%
	Pq calcareniti compatte	
	Mc calcare evaporitico	
	Mc biocalcareni	
	UAg gneiss e paragneiss	
	UA metafemiti	
	UM filladi passanti a metareniti	
	M3 metareniti e matapeliti	
Classe IV	"Medium Rocks"	2%
	Uac marmi	
	Umc dolomie grigie e calcari cristallini	
	Umm marmi	
	US calcari algali e calcari dolomitici	
	Usv arenarie rosse	

Tabella 6.1. Tabella riassuntiva delle quattro classi considerate nel fattore litologia e superficie percentuale. Le sigle fanno riferimento alla legenda della Carta Geologica della provincia di Messina. Foglio 1, scala 1:50.000 (AA. VV., 2000).

La prima classe raggruppa tutti i depositi sciolti, recenti e attuali, di origine prevalentemente alluvionale. La seconda classe comprende principalmente depositi terrigeni teneri o scarsamente diagenizzati. Della terza classe fanno parte depositi clastici di natura calcarea e le unità metamorfiche, le quali presentano fenomeni di alterazione pervasivi e diffusi (vedi paragrafo 3.5). Infine, la quarta classe raggruppa principalmente rocce calcaree a struttura cristallina. La tabella 6.1 riassume le litologie raggruppate in ogni classe, la mappa risultante è mostrata in Fig.6.6.

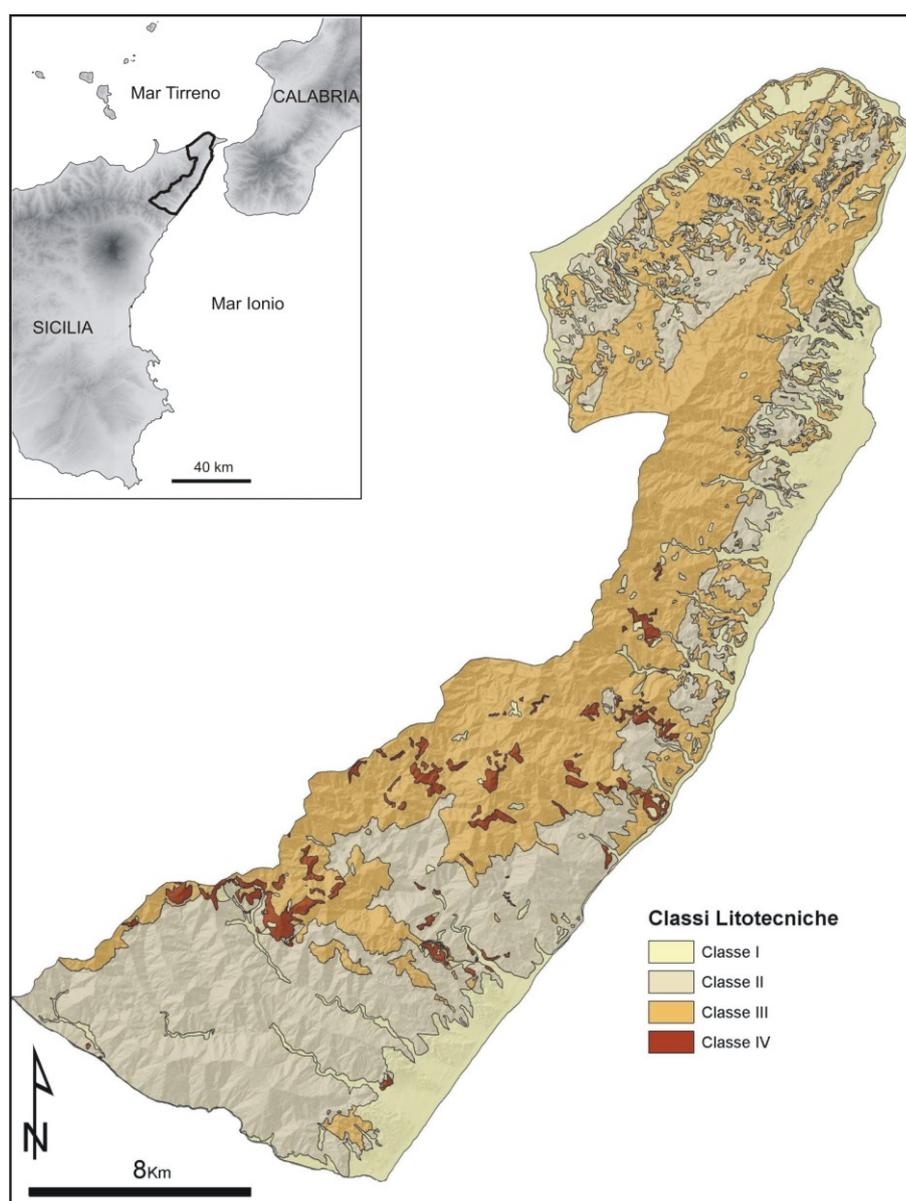


Fig. 6.6. Mappa delle classi litotecniche raggruppate secondo la Tabella 6.1.

Una campagna estensiva di misure della qualità degli ammassi rocciosi, condotta su tutta l'area oggetto di studio, non è attuabile sia in termini di tempo che

in termini economici. Pertanto, non è possibile produrre un fattore che descriva le caratteristiche geomeccaniche così come è stato elaborato per il modello a scala maggiore. Considerando la presenza di lineamenti strutturali fondamentale nel determinare la qualità degli ammassi rocciosi, e tenendo conto dell'esistenza di un fattore che include già le differenze tra i vari litotipi, è stata elaborata una mappa della "densità di lineamenti" tettonici. Questo tipo di elaborazione è largamente usato nella letteratura specialistica (van Westen et al., 2008). Ancora una volta la base per l'elaborazione è costituita dalla Carta Geologica della Provincia di Messina (AA. VV., 2000), non si è tenuto conto della distinzione tra i differenti tipi di strutture tettoniche (faglie normali, faglie trascorrenti, thrust). La densità è definita come la lunghezza totale di lineamenti per unità di superficie, su tutta l'area in studio. L'intervallo di densità risultante è stato suddiviso in sei parti uguali che costituiscono le sei classi della mappa in Fig.6.7.

L'esposizione dei versanti è stata trascurata poiché una parte dell'area studiata ricade nel settore tirrenico dei Monti Peloritani. In questa zona, il fattore esposizione non è controllato dagli stessi fattori che controllano l'esposizione nel versante ionico (vedi 6.2); è stato invece introdotto il fattore "quota" (Fig. 6.8). L'altitudine è spesso messa in relazione con la probabilità di dissesti e considerata nelle analisi di suscettibilità (van Westen et al., 2008), sia per l'aumento delle precipitazioni in relazione all'altitudine, che per l'aumento del gradiente topografico che generalmente interessa un sistema montuoso.

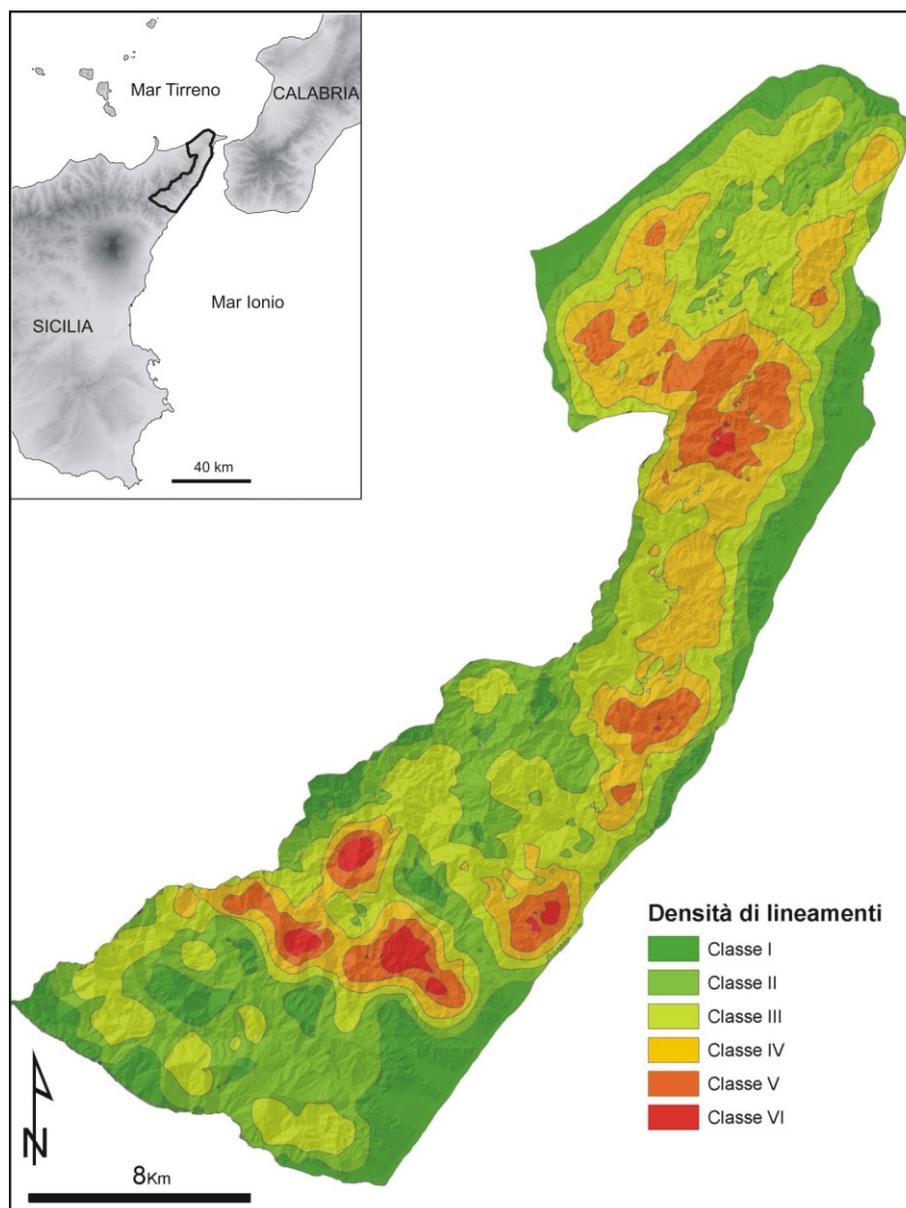


Fig. 6.7. Mappa delle classi di densità di lineamenti strutturali.

Diversamente, nel caso in esame, il gradiente topografico non sempre è direttamente correlabile con l'aumento della quota altimetrica. Pertanto la scelta di questo fattore è legata anche alla storia evolutiva tardo-quadernaria di tutto l'arco calabro e in particolare del settore in studio. Esistono infatti indizi morfologici quali terrazzi marini, orli di erosione, e più in generale, paesaggi relitti (vedi paragrafo 3.4.1), che sono il risultato dei processi di evoluzione del rilievo durante le diverse fasi climatiche tardo-quadernarie. In particolare, l'area in esame ha subito un sollevamento generale iniziato nel Pleistocene medio e le cui evidenze sono delle estese spianate che si ritrovano ad altitudini comprese solitamente tra i 500 e i 600 m s.l.m. Il processo di sollevamento si è poi intensificato a partire da 125 ka (Catalano

& De Guidi, 2003; De Guidi et al., 2003). Il sollevamento determina erosione regressiva, dal livello base verso monte, pertanto le porzioni di territorio a quote inferiori sono quelle che nel medio e breve termine sono state maggiormente interessate da processi erosivi. Nell'elaborazione del modello, i pesi associati alle classi altimetriche variano in funzione della posizione rispetto ai principali elementi morfologici precedentemente descritti.

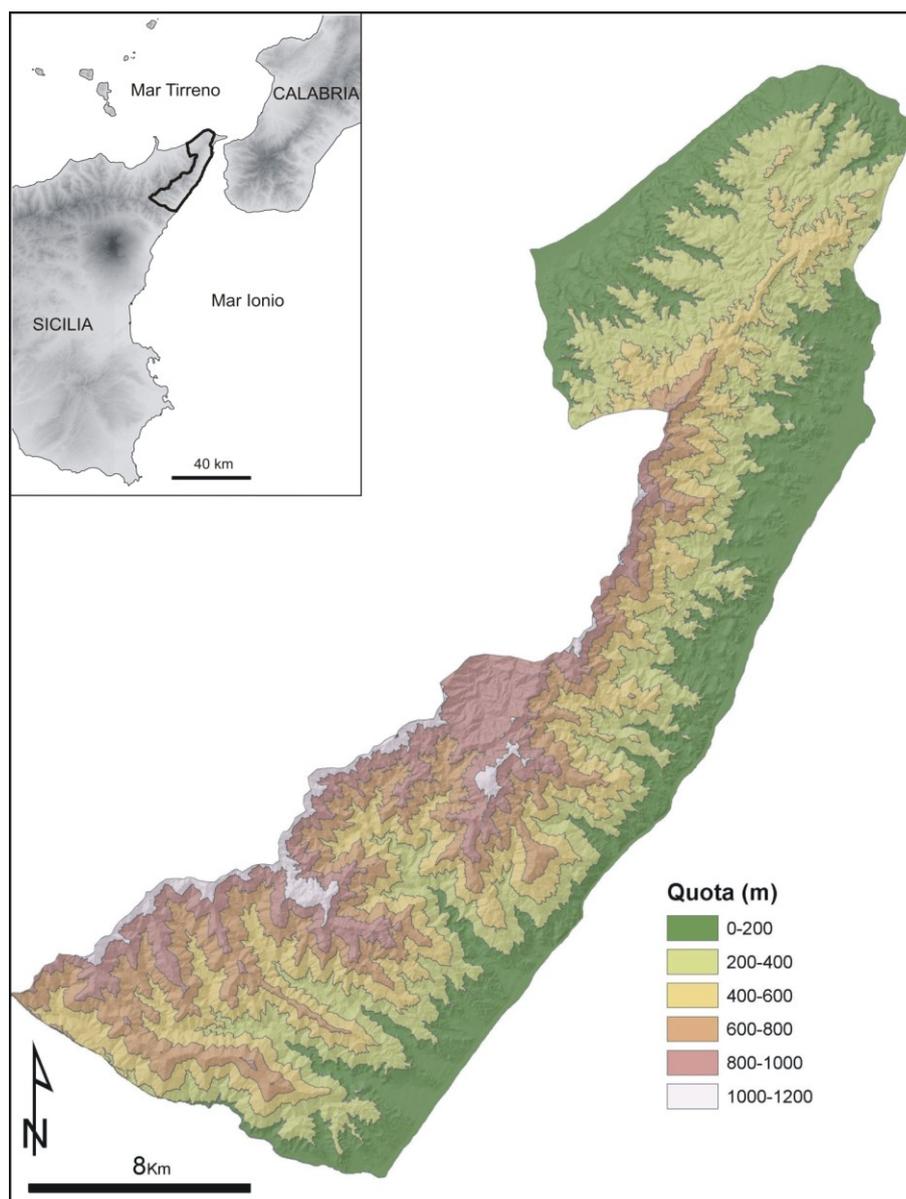


Fig. 6.8 Mappa delle classi altimetriche.

L'importanza della pendenza tra i fattori che influenzano i dissesti è stata già discussa nel paragrafo 4.4. La carta delle pendenze è stata prodotta elaborando le isolinee dalla base cartografica CTR, alla scala 1:10.000 ed equidistanza 10 m (Fig.

6.9). La suddivisione in intervalli è analoga a quella del modello prodotto alla scala di bacino, e rispecchia l'andamento della frequenza dei dissesti superficiali in funzione dell'angolo di pendio.

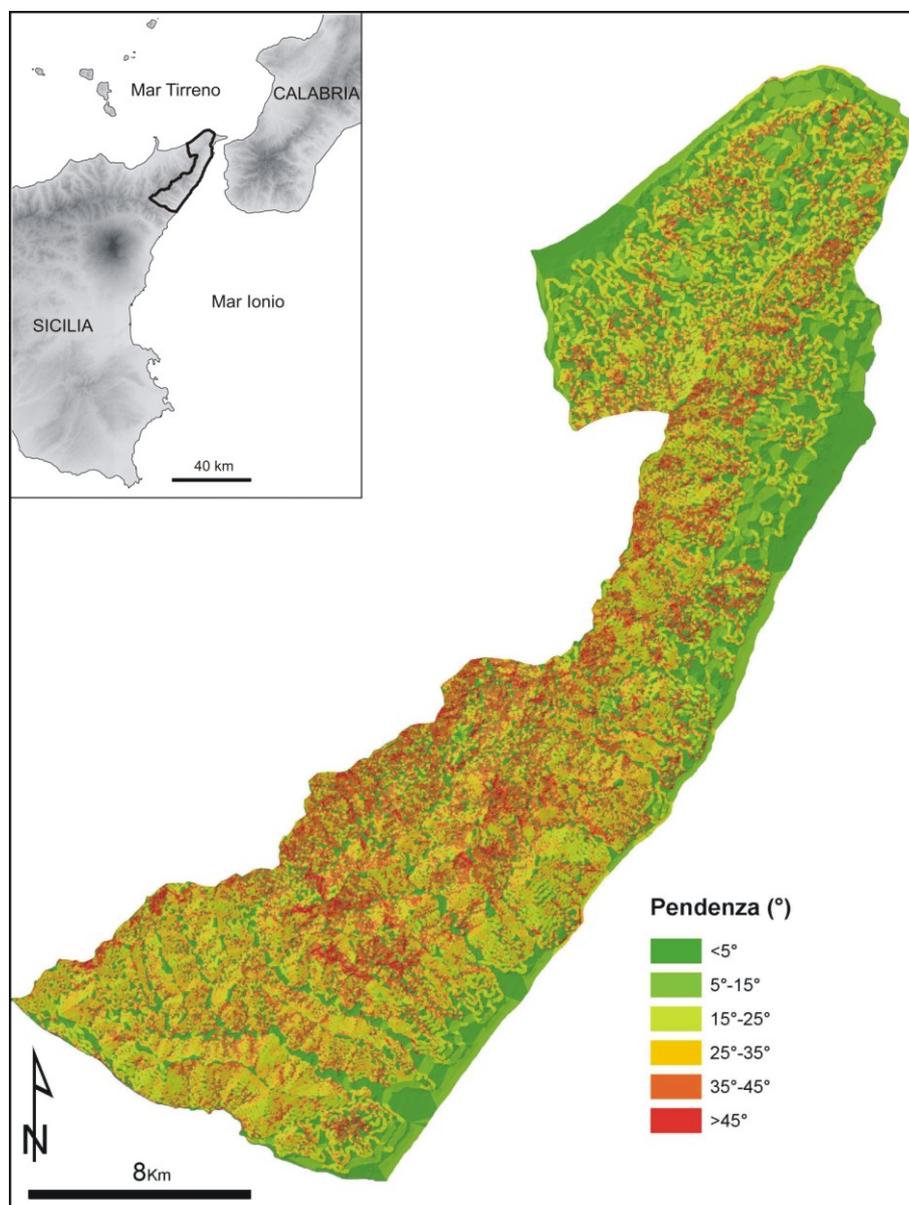


Fig. 6.9. Mappa delle classi di pendenza.

La presenza del reticolo di drenaggio è stata nuovamente presa in considerazione. Per questa elaborazione le classi di distanza sono state sostituite da classi di densità, per una più facile elaborazione della mappa. Infatti la densità di drenaggio corrisponde alla lunghezza totale di segmenti fluviali nell'unità di mappa, non tenendo conto del verso dei segmenti; diversamente, la suddivisione in classi di distanza deve tener conto dell'esistenza degli spartiacque tra i diversi bacini. L'intero

intervallo di densità è stato suddiviso in sei parti uguali che costituiscono le sei classi della mappa in Fig. 6.10.

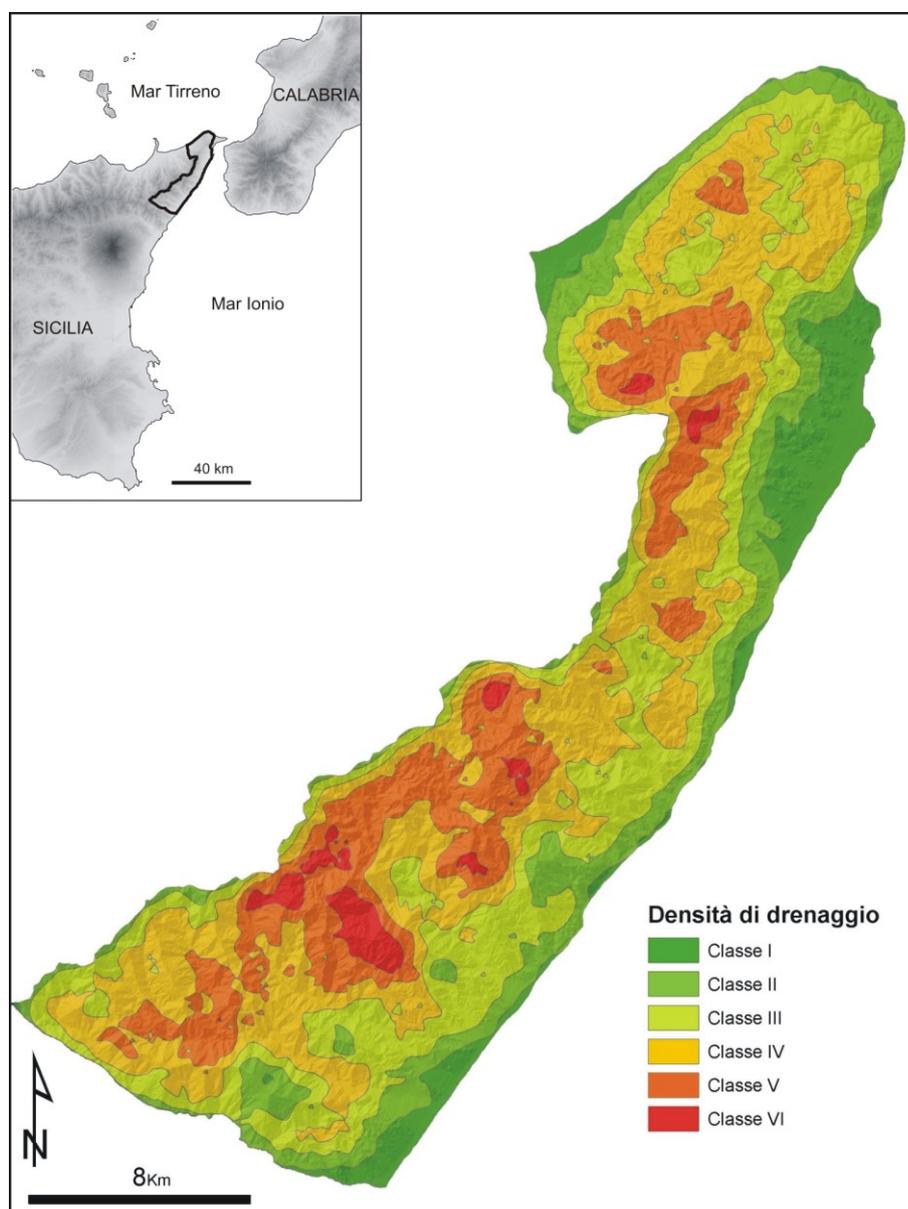


Fig. 6.10 Mappa delle classi di densità di drenaggio.

Come detto, la variazione spaziale del sollevamento, in quanto processo tettonico dominante, è considerata per la costruzione di un fattore che esprima il “potenziale morfogenetico” dell’area. La mappa è stata disegnata tenendo conto delle due componenti del sollevamento: una componente regionale con effetto uniforme su tutta l’area, ed una ad azione locale, dovuta all’attività della faglia di Taormina (Catalano & De Guidi, 2003). Sono stati presi in considerazione i valori del tasso di sollevamento olocenico, da letteratura, in particolare quelli degli ultimi 5.000

anni (Stewart et al., 1997; Rust & Kershaw, 2000; Antonioli et al., 2003; De Guidi et al., 2003; Scicchitano et al., 2011; Spampinato et al., 2012), e l'andamento della deformazione della faglia di Taormina (Catalano & De Guidi, 2003).

La componente di sollevamento riconducibile all'attività della faglia è stata scalata nello spazio. Nella direzione trasversale alla struttura, la deformazione è stata ridotta in accordo al modello elastico proposto da King et al. (1988) (Fig.6.11); longitudinalmente alla struttura, il trend di deformazione ricalca quello osservato sui marker morfologici degli ultimi 125 Ka (Catalano & De Guidi, 2003) (Fig.6.12). L'intero intervallo del valore del tasso di sollevamento è stato suddiviso in cinque classi uguali. Come per gli altri fattori, nelle analisi di suscettibilità non è importante il valore assoluto del parametro in esame, bensì l'esistenza di classi delimitate alle quali è associato un peso differente (mappe relative) (Fig. 6.13).

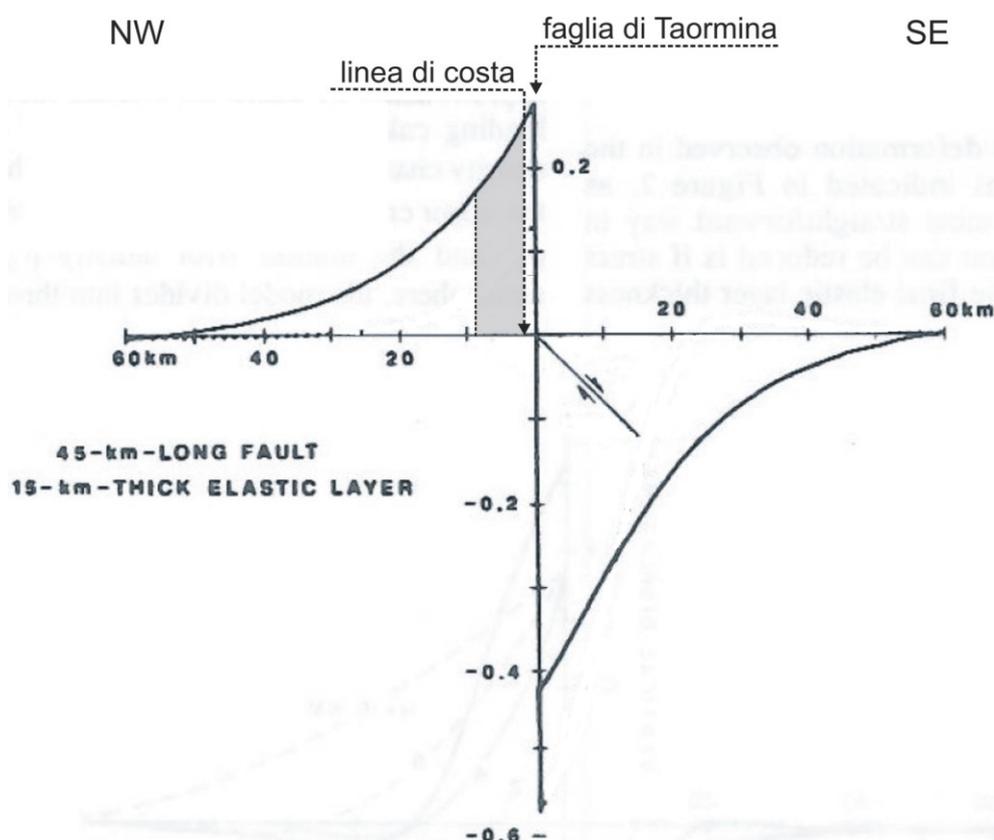


Fig. 6.11. Deformazione associata ad una faglia normale secondo King et al. (1988). In grigio la porzione di curva che ricade nell'area di studio.

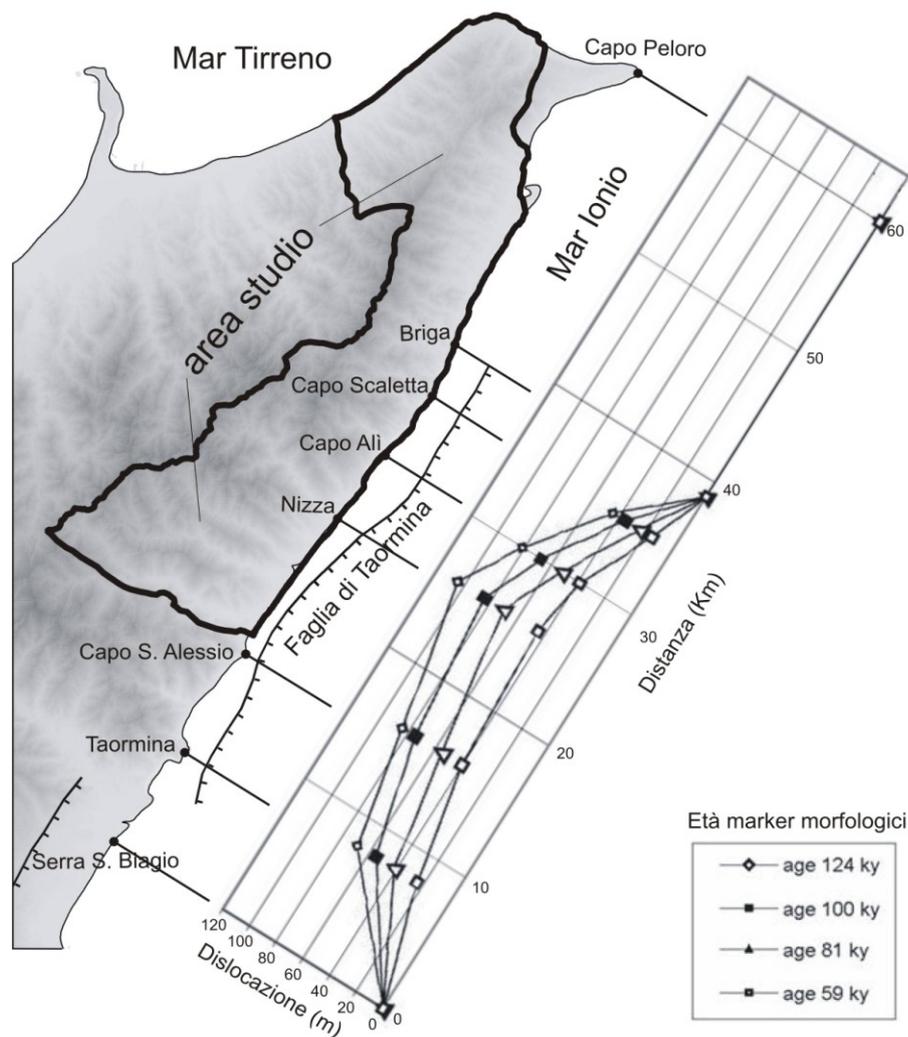


Fig. 6.12. Andamento longitudinale della deformazione associata alla faglia di Taormina, ottenuto ricostruendo diversi marker geologici tardo-quadernari (Catalano & De Guidi, 2003).

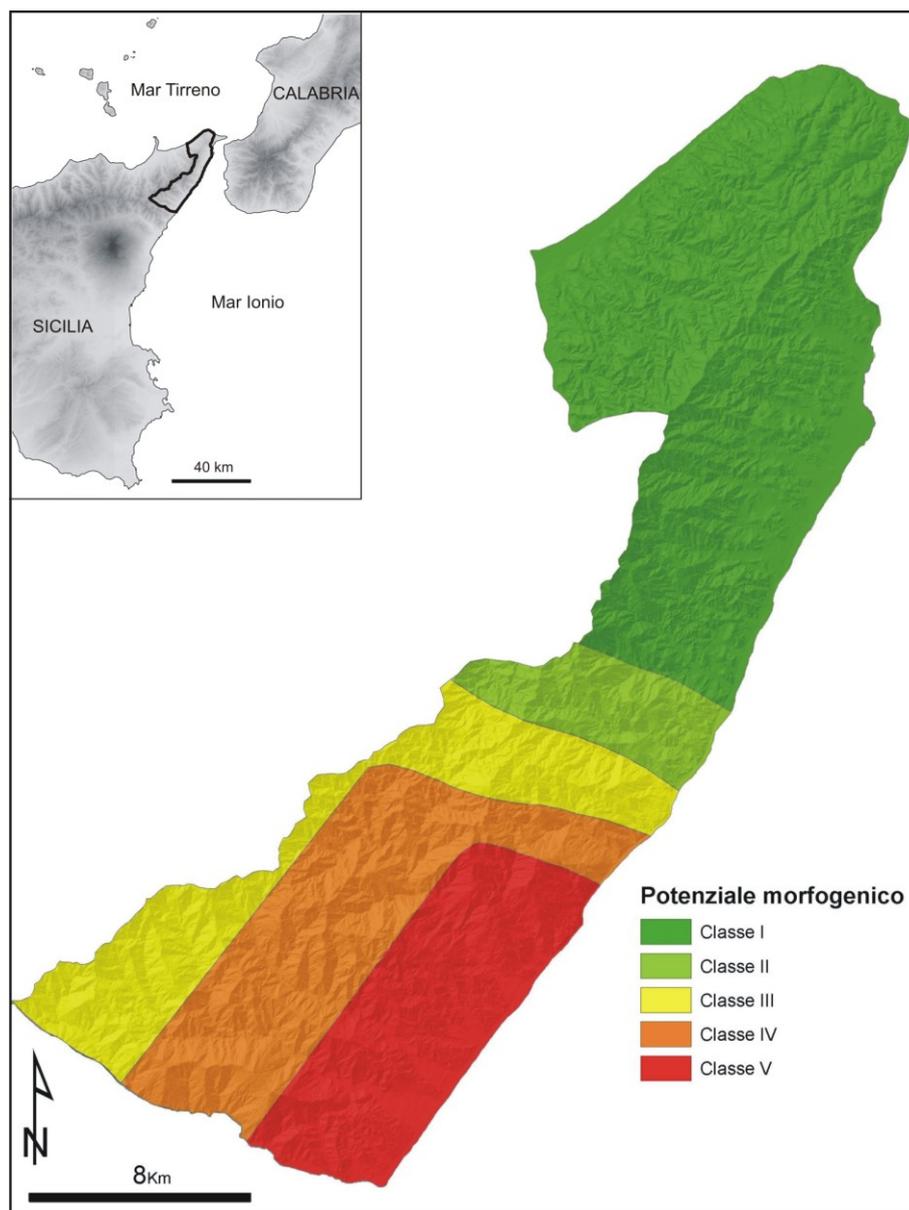


Fig. 6.13. Mappa delle classi del “potenziale morfogenico”.

6.3.3. Elaborazioni

Ad ognuna delle classi delle mappe (i.e. fattori) appena descritti è stato associato un “peso” numerico. L’attribuzione dei pesi ha tenuto conto dei risultati del metodo quantitativo a scala di bacino (Cap. 5) e di un altro modello empirico anch’esso elaborato in un’area compresa in quella in esame (Falconi et al., 2011). Un peso è anche associato ad ognuno dei fattori. Sono state eseguite sei diverse elaborazioni, effettuando delle variazioni nell’attribuzione dei valori (Tabella 6.2).

I pesi sono stati successivamente associati ad ognuno degli oggetti presenti nelle mappe tramite operazioni sul sistema GIS; le mappe sono quindi sovrapposte e, per ogni unità di mappa risultante, è calcolato il valore dell’indice di suscettibilità (LSI) secondo l’equazione:

$$LSI = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij}$$

con:

LSI	indice di suscettibilità da frana (Landslide Susceptibility Index);
w_{ij}	peso della classe i del parametro j;
W_j	peso del fattore j-esimo;
n	numero totale di fattori

Dall’intersezione delle sei mappe si ottiene quindi un’ulteriore mappa composta da 9221 unità di superficie, ognuna delle quali caratterizzata da un determinato valore dell’indice di suscettibilità. Ancora una volta è necessario tornare ad una mappa che esprima la suscettibilità in maniera qualitativa (vedi paragrafo 5.1) le classi scelte sono cinque: suscettibilità nulla (N), suscettibilità bassa (L), suscettibilità media (M), suscettibilità alta (H), suscettibilità molto alta (VH).

Gli intervalli di LSI da associare ad ognuna delle classi sono stati selezionati esaminando la distribuzione di frequenza e applicando l’algoritmo di Jenks dei *natural breaks* (Fig. 6.14) Le sei mappe di suscettibilità finali sono mostrate nelle Fig.(6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19, 6.20).

I risultati ottenuti con le diverse elaborazioni sono generalmente confrontabili (Fig. 6.21); mediamente il 9,8% della superficie è classificato a suscettibilità nulla, il 13,3% a suscettibilità bassa, il 21,5% a suscettibilità media, il 32,8 a suscettibilità alta, ed infine il 22,5 a suscettibilità molto alta.

FATTORI / classi	Superficie (%)	Pesi					
		Elab. 1	Elab. 2	Elab. 3	Elab. 4	Elab. 5	Elab. 6
LITOLOGIA		5	1	10	5	5	7
rocce sciolte	17%	2	2	2	2	4	4
soft rocks	11%	5	5	5	5	10	10
medium rocks	70%	4	4	4	4	8	8
hard rocks	2%	1	1	1	1	2	2
DENSITA' DI DRENAGGIO		2	1	4	2	3	5
Classe I	9%	1	1	1	1	1	1
Classe II	14%	3	3	3	3	3	3
Classe III	26%	5	5	5	5	5	5
Classe IV	31%	7	7	7	7	7	7
Classe V	17%	9	9	9	9	9	9
Classe VI	3%	10	10	10	10	10	10
DENSITA' DI LINEAMENTI		3	1	6	3	4	4
Classe I	16%	1	1	1	1	1	1
Classe II	26%	3	3	3	3	3	3
Classe III	30%	5	5	5	5	5	5
Classe IV	18%	7	7	7	7	7	7
Classe V	8%	9	9	9	9	9	9
Classe VI	2%	10	10	10	10	10	10
QUOTA (m)		2	1	4	2	2	3
0-200	28%	8	8	8	8	6	6
200-400	26%	6	6	6	6	5	5
400-600	19%	3	3	3	3	4	4
600-800	14%	2	2	2	2	3	3
800-1000	10%	6	6	6	6	6	6
1000-1200	3%	5	5	5	5	5	5
PENDENZA (°)		5	1	10	5	5	8
<5	17%	0	0	0	0	1	1
5-15	9%	1	1	1	1	2	2
15-25	20%	4	4	4	4	4	4
25-35	30%	7	7	7	7	8	8
35-45	18%	10	10	10	10	10	10
>45	6%	6	6	6	6	6	6
POTENZIALE MORFOGENICO		4	1	8	1	2	3
Classe I	44%	10	10	10	10	10	10
Classe II	6%	8	8	8	8	8	8
Classe III	15%	6	6	6	6	6	6
Classe IV	19%	4	4	4	4	4	4
Classe V	16%	2	2	2	2	2	2

Tabella 6.2. Pesi assegnati alle classi dei sei fattori per le varie elaborazioni.

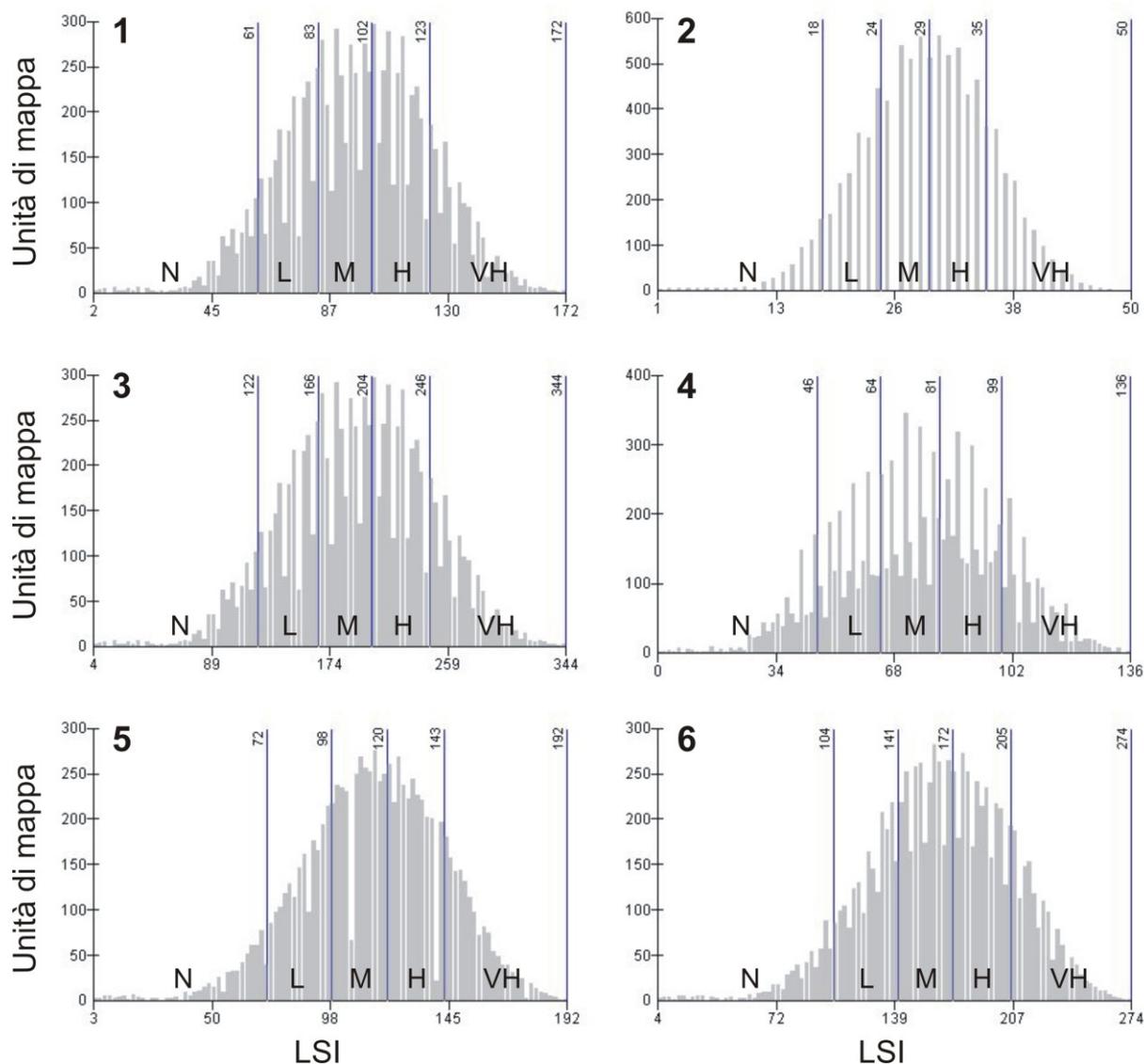


Fig. 6.14. Distribuzione di frequenza dell'indice di suscettibilità (LSI) per le varie elaborazioni e suddivisione in intervalli secondo i *natural breaks* (Jenks Algorithm). N: suscettibilità nulla; L: suscettibilità bassa; M: suscettibilità media; H: suscettibilità alta; VH: suscettibilità molto alta.

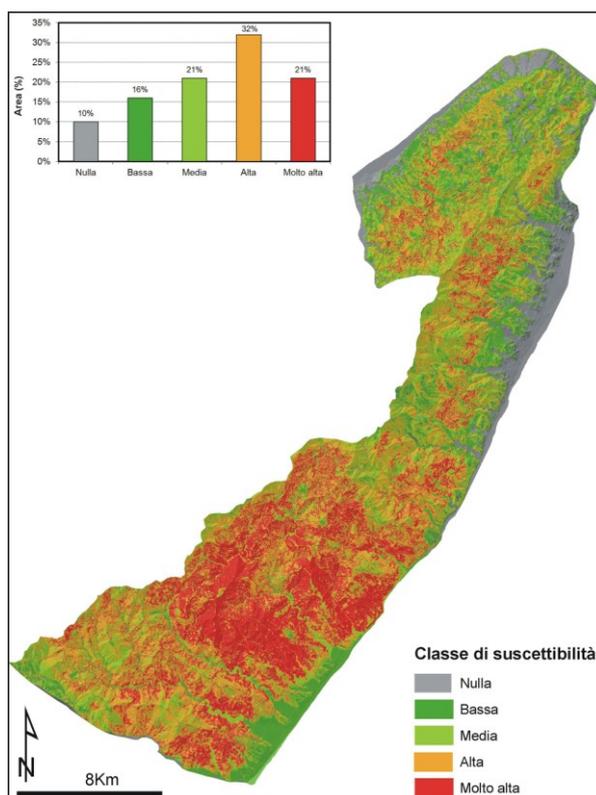


Fig. 6.15. Mappa di suscettibilità ed estensione percentuale delle varie classi (elaborazione 1).

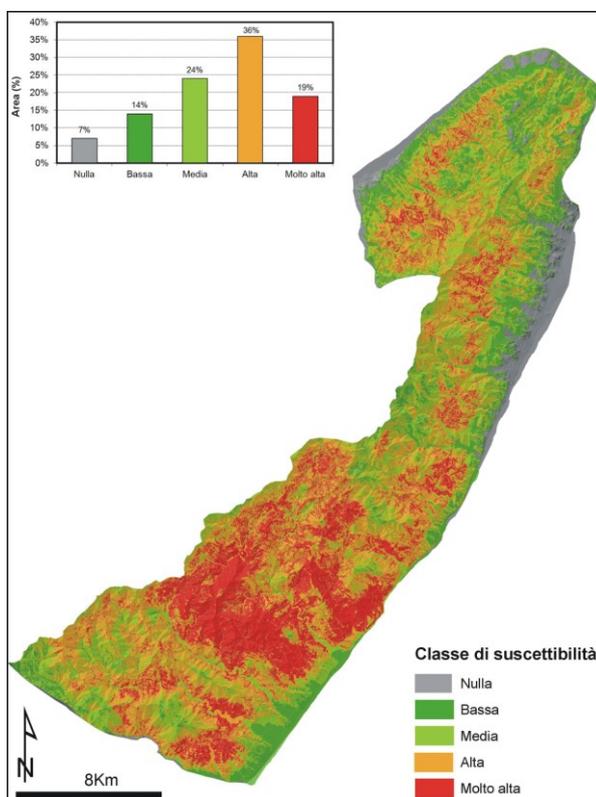


Fig. 6.16 Mappa di suscettibilità ed estensione percentuale delle varie classi (elaborazione 2).

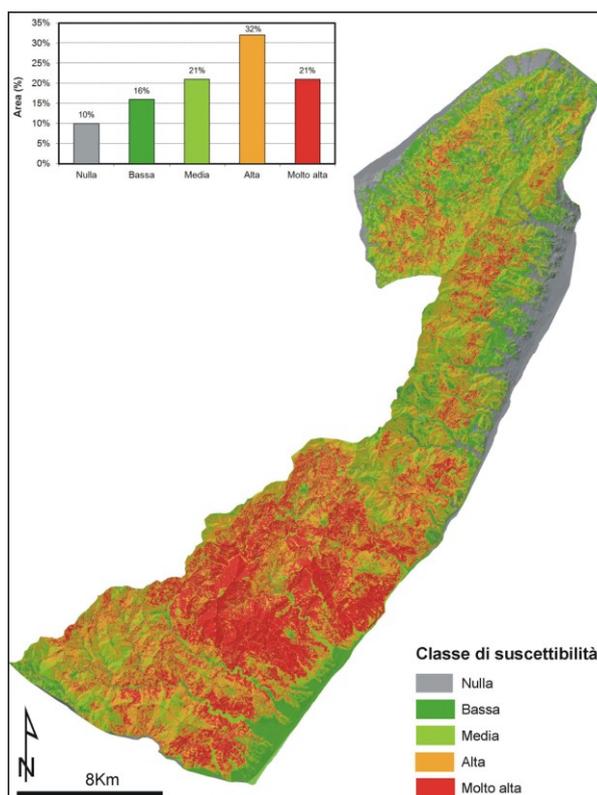


Fig. 6.17. Mappa di suscettibilità ed estensione percentuale delle varie classi (elaborazione 3).

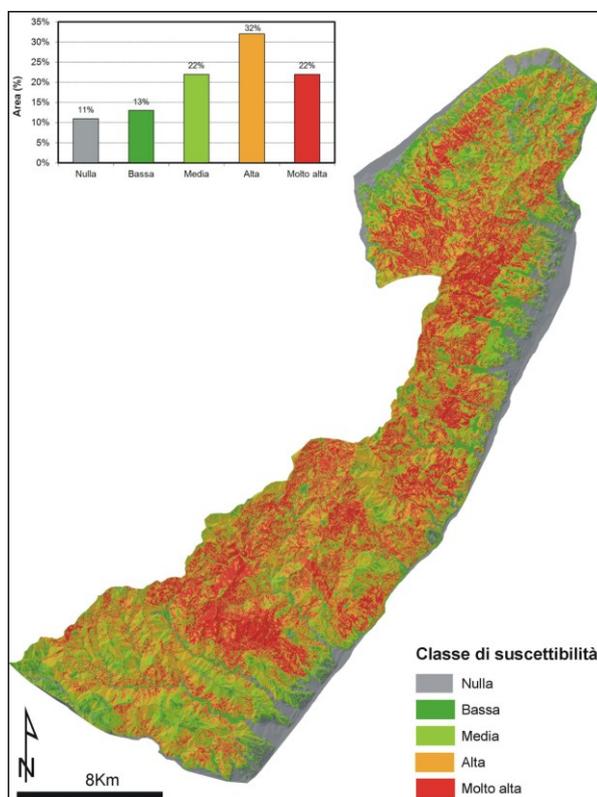


Fig. 6.18. Mappa di suscettibilità ed estensione percentuale delle varie classi (elaborazione 4).

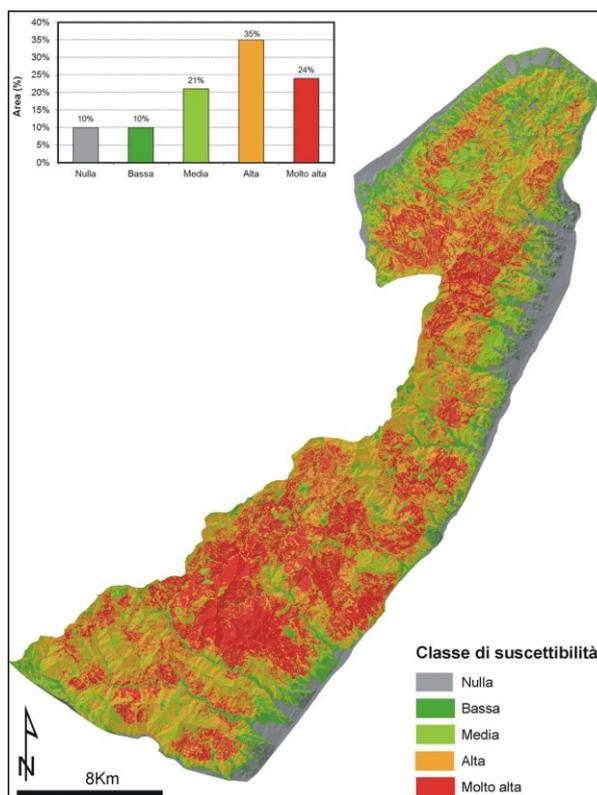


Fig. 6.19. Mappa di suscettibilità ed estensione percentuale delle varie classi (elaborazione 5).

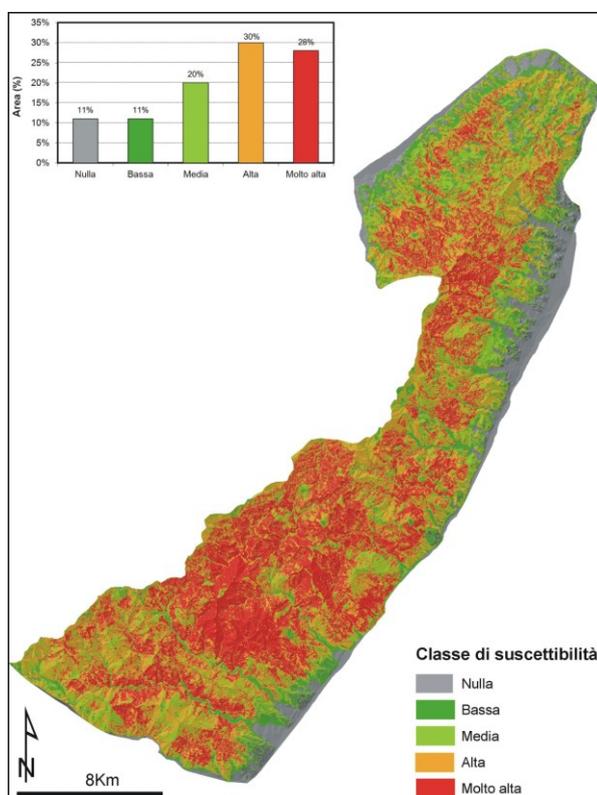


Fig. 6.20. Mappa di suscettibilità ed estensione percentuale delle varie classi (elaborazione 6).

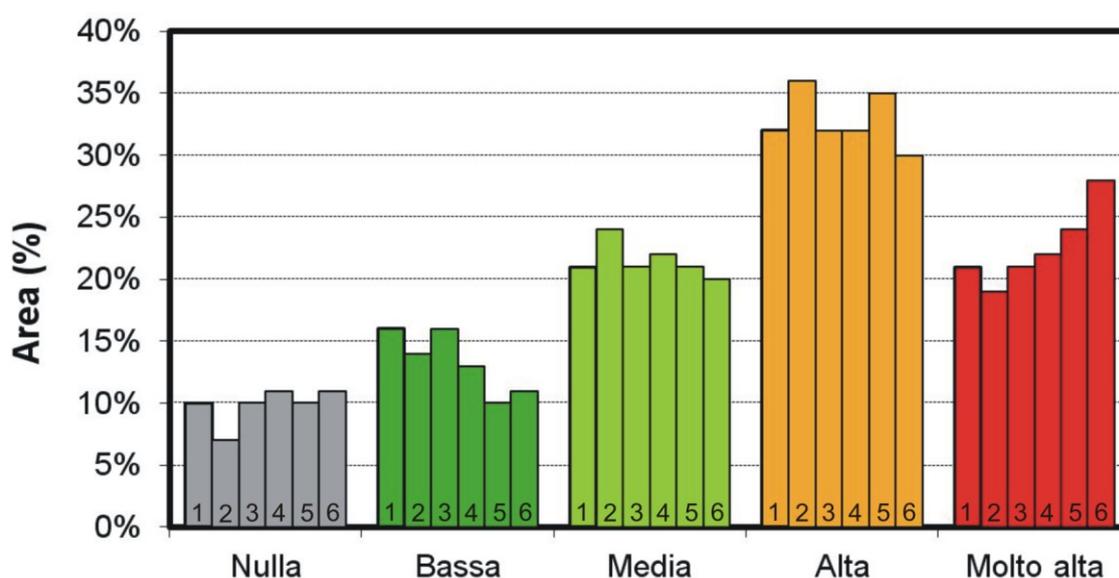


Fig. 6.21. Confronto, per le diverse elaborazioni, dell'estensione percentuale delle classi di suscettibilità.

6.3.4. Risultati

I vari modelli sono stati prodotti senza l'utilizzo diretto di un catalogo dei dissesti. Le mappe di suscettibilità sono state incrociate *a posteriori* con il catalogo dei dissesti del 1° Ottobre 2009 (paragrafo 4.1). Benché i dissesti censiti siano numerosi (1320), la loro distribuzione è limitata solo ad una porzione dell'area di elaborazione del modello (<10%) (Fig. 6.22). L'estensione ridotta del catalogo potrebbe costituire un limite per la verifica in quanto essa non sarà in grado di "esplorare" la relazione di dipendenza tra i dissesti e tutte le classi dei fattori. Questa situazione potrebbe soprattutto interessare il fattore "potenziale morfogenico" poiché è quello la cui distribuzione in classi ha variabilità a piccola scala. Per gli altri fattori, l'effetto è ridotto in quanto la variabilità spaziale delle classi è elevata, quindi anche in un'area ridotta, tutte le classi sono rappresentate.

Sono state elaborate le curve di prestazione (tasso di successo) riportando sull'asse delle ascisse la percentuale cumulativa dell'area per ogni classe di suscettibilità e sull'asse delle ordinate la percentuale cumulativa di frane nelle stesse classi, in ordine inverso di suscettibilità (Fig. 6.23). È possibile confrontare le curve corrispondenti alle diverse elaborazioni per determinarne l'attendibilità. La forma della curva fornisce informazioni riguardo il grado di successo del modello; infatti

maggiore l'area sottesa dalla curva (A.U.C.) maggiore risulterà il rendimento del modello (vedi paragrafo 5.2) (Fig. 6.24).

Le varie elaborazioni sono tra loro essenzialmente equivalenti, sebbene la "4" è quella che meglio riesce a classificare i dissesti; in generale le elaborazioni possono essere definite soddisfacenti (Guzzetti et al., 2006b). I dissesti correttamente classificati sono mediamente il 76%, mentre quelli che ricadono nelle zone a suscettibilità nulla o bassa sono in media il 6% (Fig. 6.25 e 6.26). Il generale accordo che risulta dalle varie elaborazioni indica che la base del modello empirico (i.e. modello quantitativo) è una base valida e consistente e che la selezione dei fattori è stata effettuata in maniera corretta.



Fig. 6.22. Distribuzione del catalogo dei dissesti del 1° Ottobre 2009.

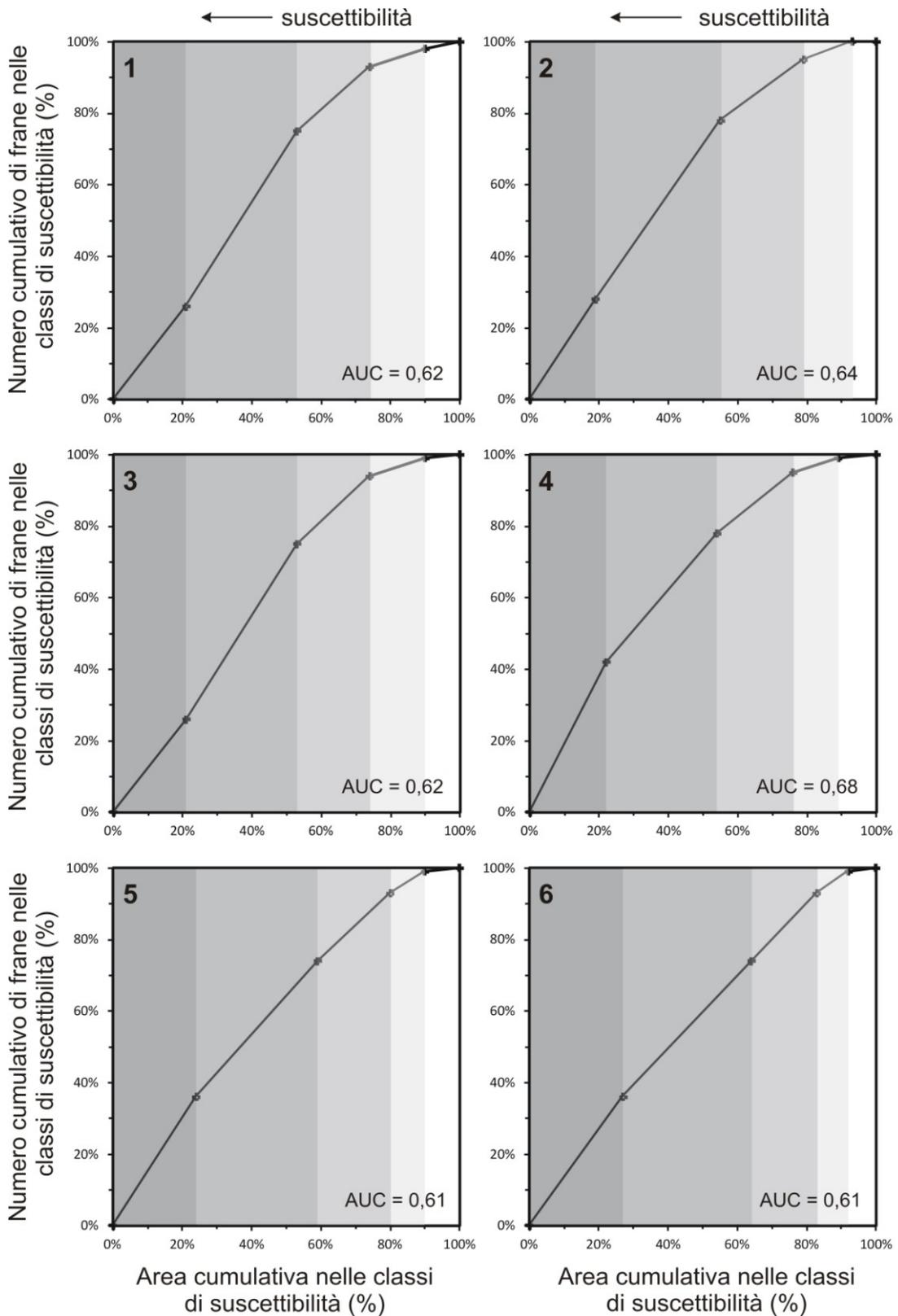


Fig. 6.23. Curve del tasso di successo (*success rate curves*) per le varie elaborazioni; è riportato il valore dell'integrale di ogni curva (AUC). La scala di grigio indica classi di suscettibilità crescenti (da nulla a molto alta).

Nella porzione dove è presente il catalogo è possibile apprezzare la corrispondenza tra la mappa di suscettibilità e la distribuzione dei dissesti (Fig. 6.27 e Fig. 6.28). Inoltre evidenziando i valori massimi dell'indice di suscettibilità (il 2% più suscettibile dell'intero territorio), è stato possibile appurare come in alcune di queste aree sono evidenti gli indizi morfologici di dissesti recenti (Fig. 6.29). Come detto, i modelli di suscettibilità non considerano la probabilità temporale di accadimento; è quindi equiprobabile che i dissesti in una determinata area, classificata come molto suscettibile, si siano già verificati al momento della produzione del modello, o che si verificheranno in un futuro più o meno prossimo. La mancanza di indizi sul terreno, in un'area ad elevata suscettibilità, non pregiudicano l'attendibilità del modello, viceversa richiamano maggiormente l'attenzione in quella determinata zona.

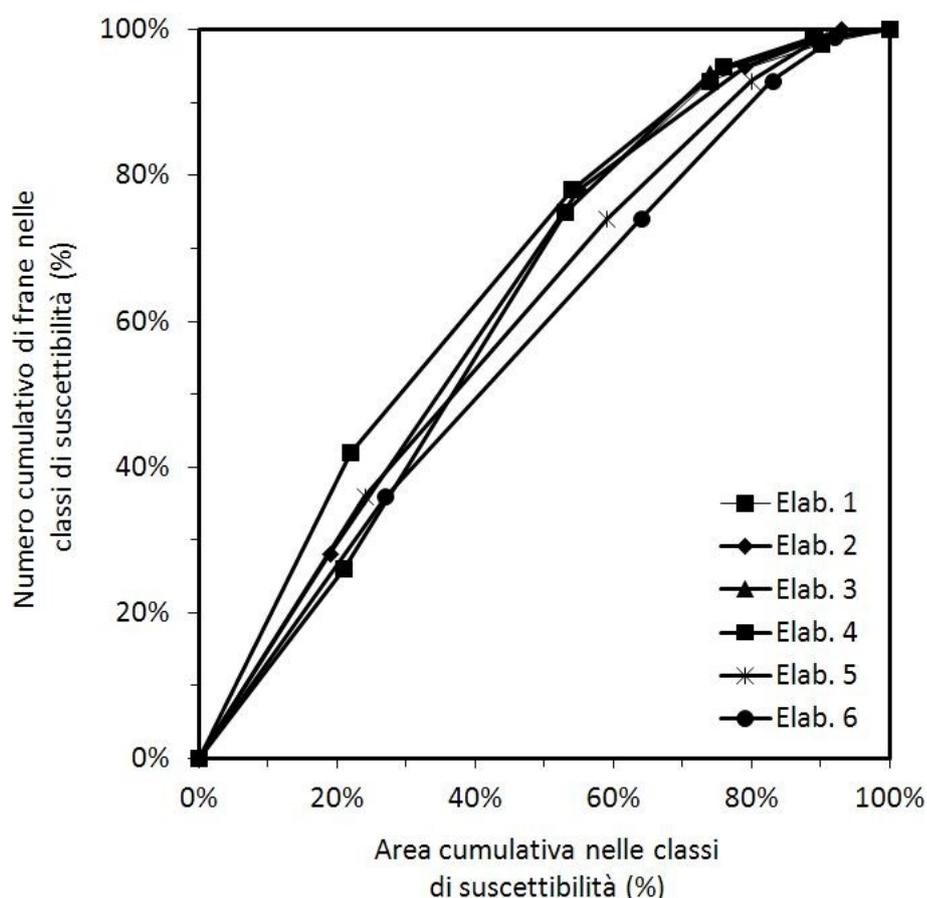


Fig. 6.24. Confronto tra le success rate curve delle diverse elaborazioni.

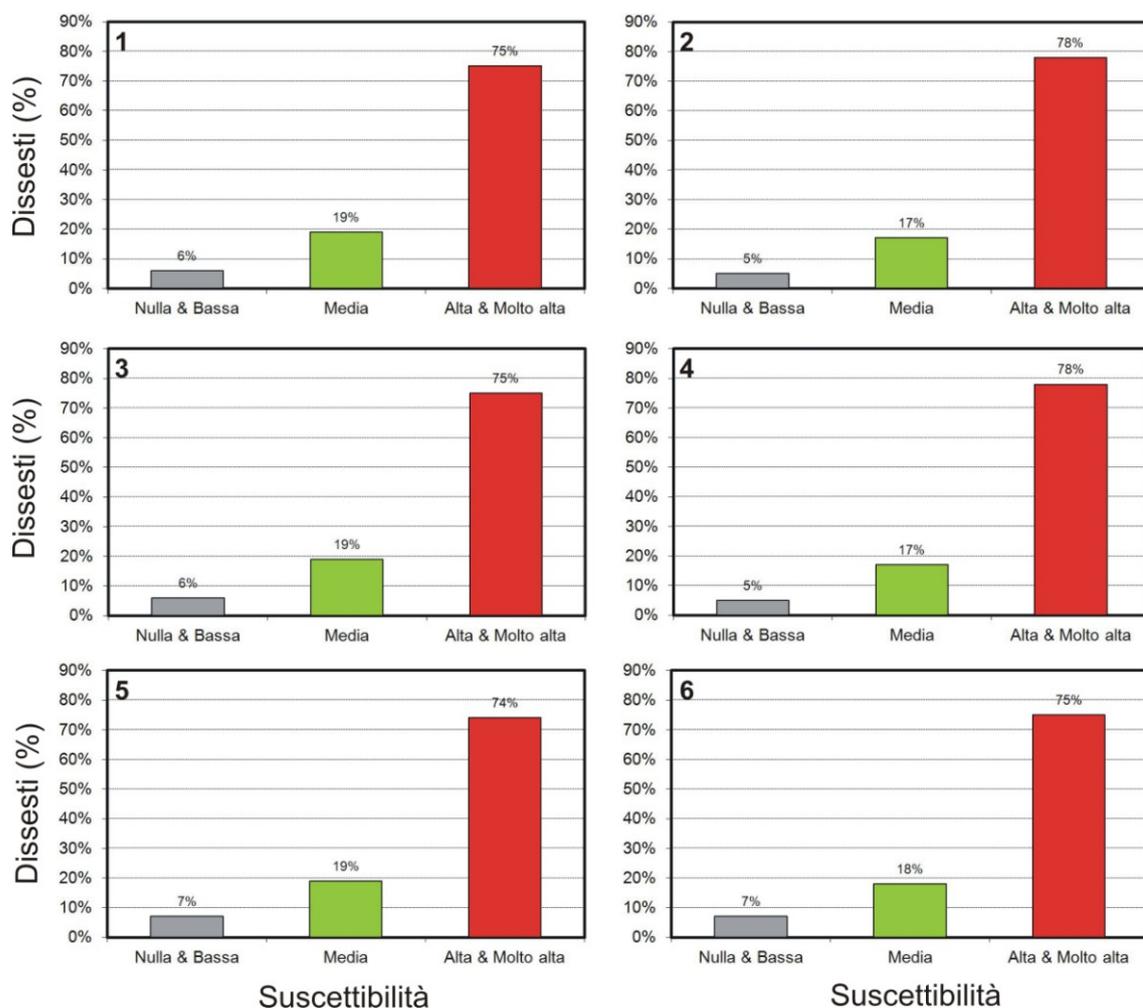


Fig. 6.25. Incidenza percentuale dei dissesti in funzione della classe di suscettibilità, per le varie elaborazioni. Sono raggruppate le classi “nulla” e “bassa”, “alta” e “molto alta”.

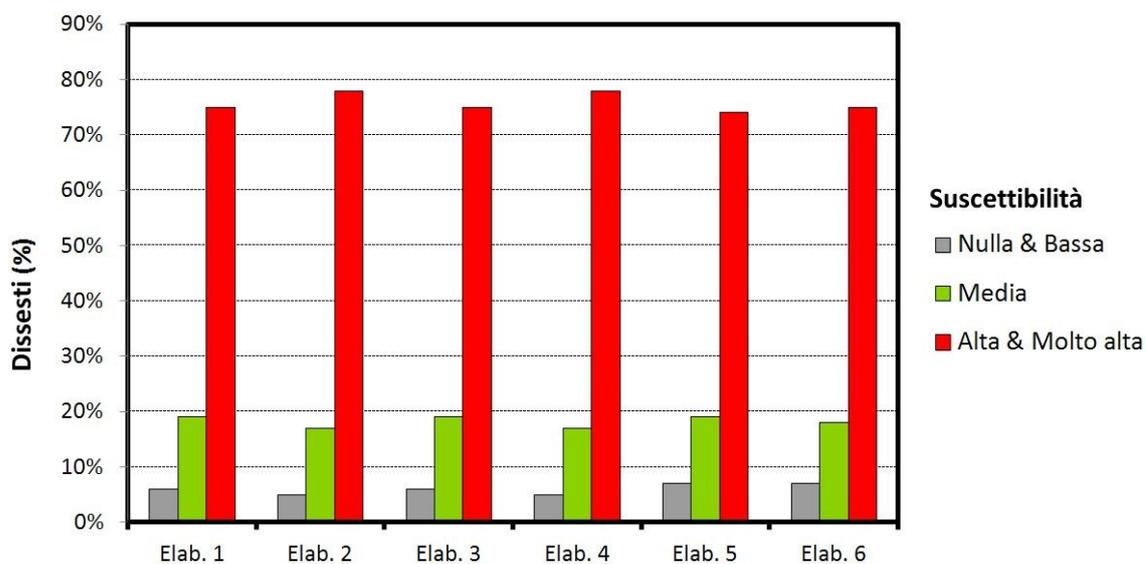


Fig. 6.26. Confronto tra le varie elaborazioni, dell'incidenza percentuale dei dissesti in funzione della classe di suscettibilità. Sono raggruppate le classi “nulla” e “bassa”, “alta” e “molto alta”.

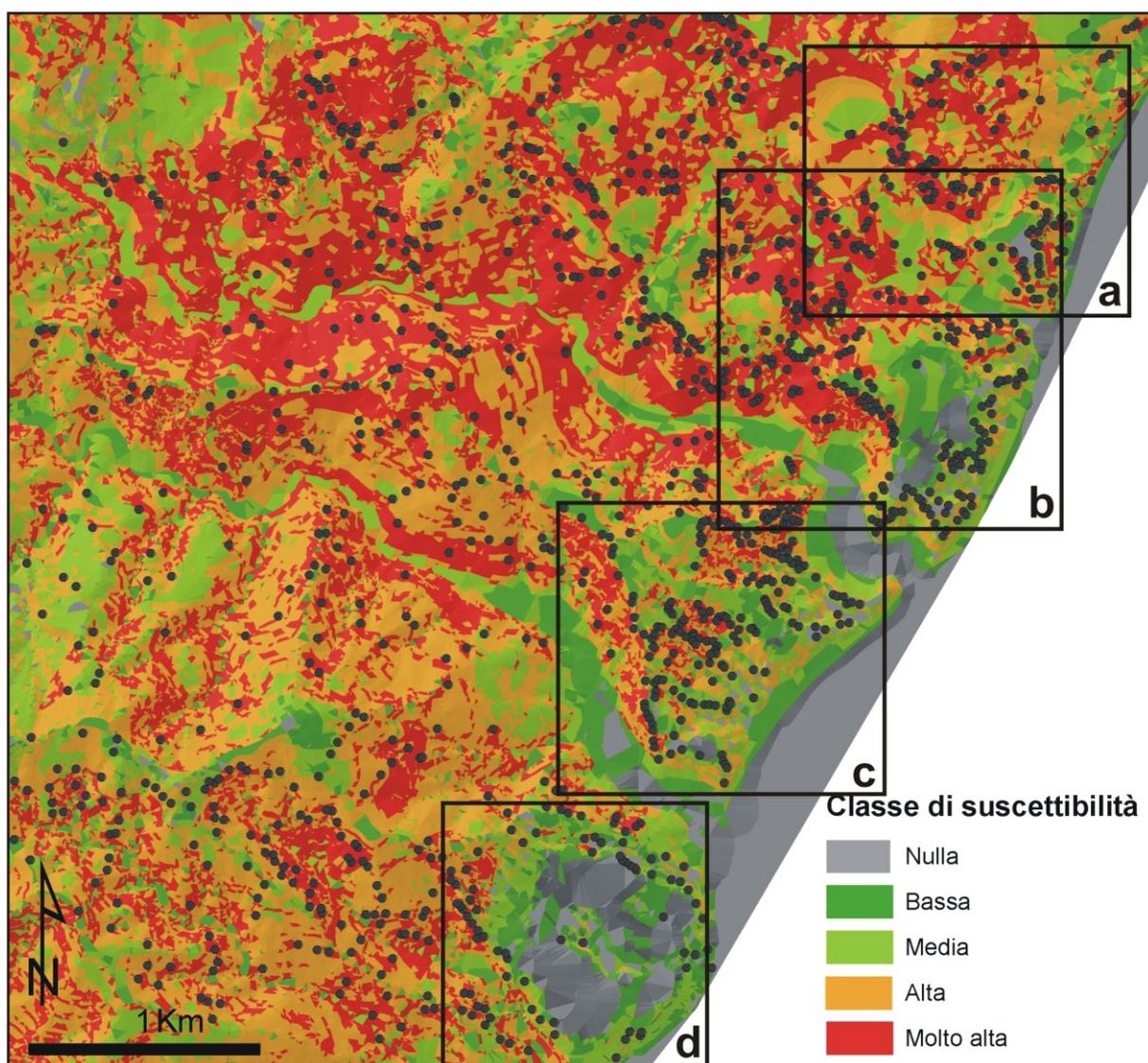


Fig. 6.27. Mappa di suscettibilità (elaborazione #4) e catalogo dei dissesti del 1 Ottobre 2009 (cerchi neri).

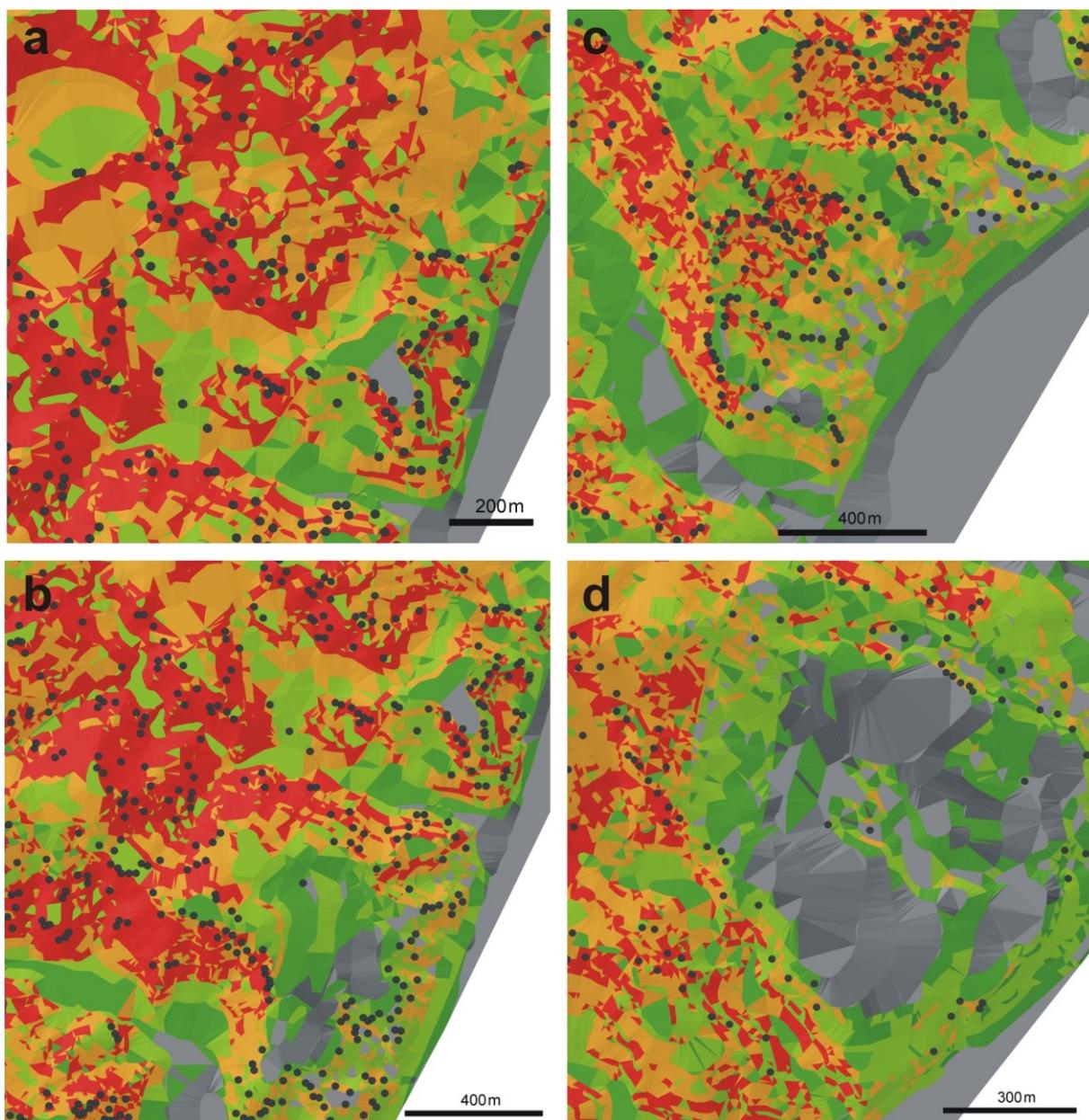


Fig. 6.28. Particolari della mappa di suscettibilità (elaborazione #4) e catalogo dei dissesti del 1 Ottobre 2009 (cerchi neri). Vedi Fig.6.27 per le localizzazioni.

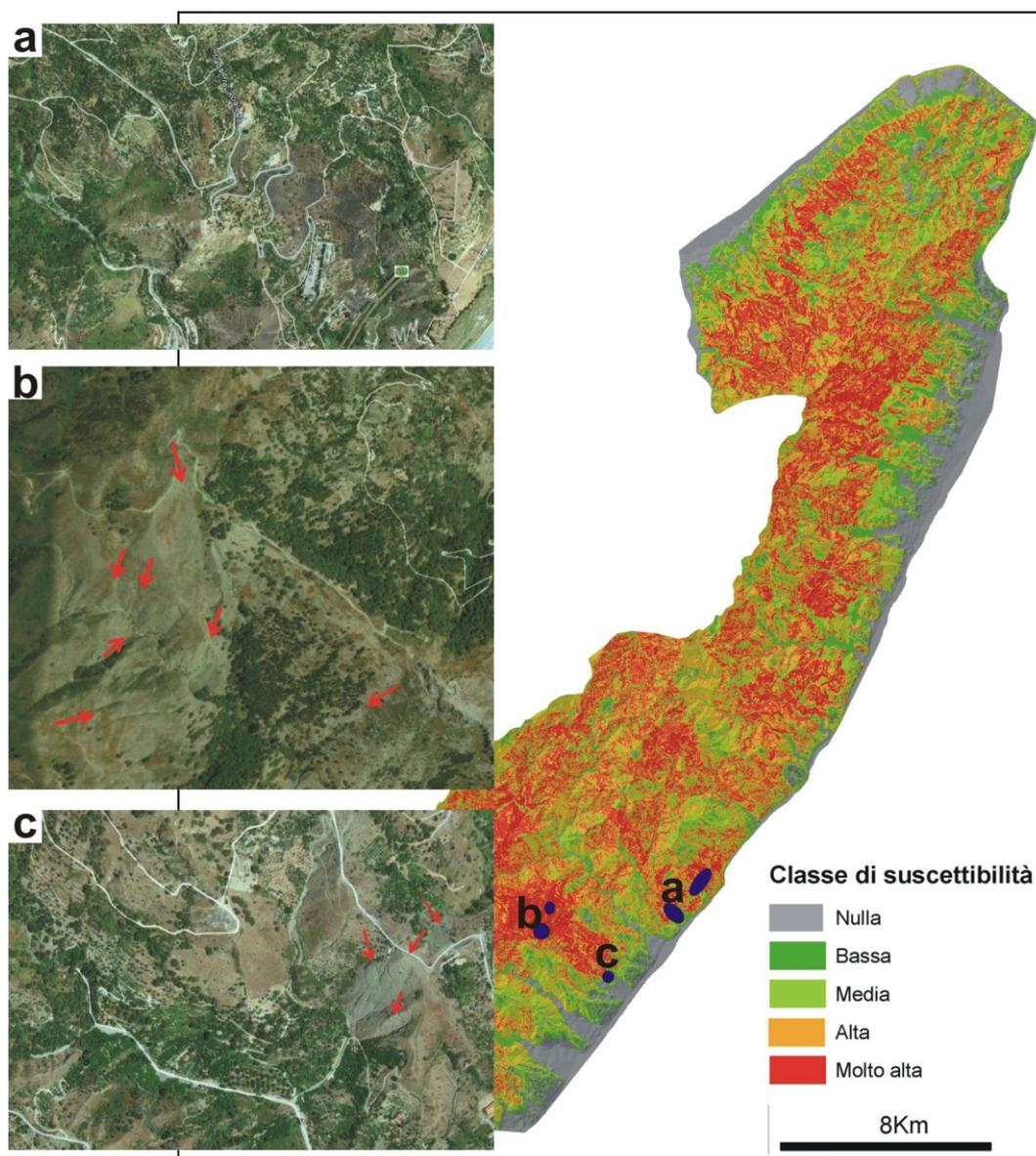


Fig. 6.29. Le zone evidenziate (punti blu) rappresentano il 2% più suscettibile del territorio. Nelle immagini satellitari sono evidenziati gli indizi di dissesti recenti.