
Strumenti di analisi e metodologie di rappresentazione in un SIT “specializzato” sul rischio sismico di frana

Giovanni BIONDI ⁽¹⁾
Antonio CONDORELLI ⁽²⁾
Michele MAUGERI ⁽¹⁾
Giuseppe MUSSUMECI ⁽²⁾

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

V.le A.Doria 6

95125 Catania,

f 095/7382249

e gbiondi@dica.unict.it;

acondor@dica.unict.it

mmaugeri@dica.unict.it;

gmussume@dica.unict.it;

⁽¹⁾ Sezione Geotecnica, tel. 095/7382231

⁽²⁾ Settore Geomatica, tel. 095/7382212

Parole chiave > GIS, valutazione del rischio, stabilità dei pendii, simulazione sismica.

Riassunto > Nel lavoro si propone la modellazione e l’implementazione di un SIT “specializzato” finalizzato all’individuazione, a grande scala, delle aree in pendio potenzialmente instabili ed alla valutazione della risposta sismica in termini di spostamenti permanenti indotti. Lo scenario sismico di riferimento è stato valutato, per il territorio della Provincia di Catania, implementando nel GIS alcune leggi di attenuazione dei valori di picco del moto al suolo. Le condizioni di stabilità sismica delle aree in pendio, invece, sono state valutate mediante un’applicazione del metodo degli spostamenti. Utilizzando correlazioni di carattere empirico sono state ottenute le distribuzioni spaziali degli spostamenti permanenti, dalle quali sono state successivamente derivate le distribuzioni del danno potenzialmente indotto. Infine, utilizzando i risultati delle modellazioni effettuate sono stati proposti abachi per la valutazione dell’estensione delle aree potenzialmente soggette a fenomeni di instabilità e per la determinazione dei corrispondenti livelli di danno indotto.

Abstract > The paper describe a specialised SIT developed in order to perform a large-scale analysis of the seismic stability conditions of natural slopes and an evaluation of the seismic response in terms of earthquake-induced permanent displacements. The scenario earthquake has been implemented in a GIS platform, for the urban and extra urban area of Catania, using attenuation relationships of peak ground motion parameters. The seismic stability condition of slopes has been evaluated using the displacement approach. Using empirical predictive models, the spatial distribution of the earthquake-induced permanent displacements has been evaluated. Then, the spatial distribution of the earthquake-induced damage has been computed using empirical displacement-damage relationships. Finally, using the results of the performed analyses, some charts for the evaluation of the extension of the unstable areas and of the corresponding level of damage, has been proposed.

1. Introduzione

L'esperienza degli ultimi decenni ha ampiamente evidenziato che i fenomeni di instabilità dei pendii naturali provocati da eventi sismici costituiscono uno dei più elevati fattori di rischio connessi a terremoti di forte intensità. La potenziale rilevanza dei volumi di materiale coinvolto e l'entità degli spostamenti fanno sì che i danni dovuti alle frane di natura sismica possano risultare anche maggiori di quelli direttamente imputabili dall'evento. Numerosi rapporti post-evento hanno infatti riportato testimonianza delle gravi conseguenze connesse alle frane indotte, in termini di perdita di vite umane e danno a strutture e infrastrutture, e, in un'ottica a più lungo termine, alle conseguenze sociali ed economiche. In particolare, le conseguenze più gravose si verificano spesso nei riguardi della funzionalità delle *lifelines*, con particolare riferimento alle reti stradali e ferroviarie che, come è ben noto, giocano un ruolo essenziale nelle immediate fasi post-sismiche per la gestione dell'emergenza nelle aree colpite [1].

A titolo di esempio si riporta qualche dato relativo a due recenti (2001) eventi sismici, il terremoto di El Salvador ed il terremoto di Nisqually (USA), che hanno dato luogo ad importanti fenomeni di instabilità dei pendii ai quali è imputabile buona parte dei danni arrecati. Relativamente al primo evento i volumi di terreno coinvolti nei movimenti franosi sono stati stimati tra i 300.000 e i 500.000 m³; il corpo di frana, investendo il centro abitato, ha distrutto circa 5.000 abitazioni (danneggiandone seriamente oltre 16.000) provocando circa 1.000 vittime e danni complessivi per circa un miliardo di dollari. Anche le infrastrutture viarie hanno subito notevoli danni. Tra le conseguenze più rilevanti il blocco della Pan-American Highway, dovuto ad una frana che ha interessato la sede stradale. Relativamente al terremoto di Nisqually, i danni più consistenti dovuti alle frane hanno anche in questo caso interessato profondamente il sistema viario, con numerose strade interrotte a causa del materiale franato in carreggiata o per via di collasso dei tratti in rilevato o in mezza-costa.

Per queste ragioni, l'analisi del comportamento sismico dei pendii naturali e la valutazione delle condizioni di funzionalità post-evento delle strutture in terra presenti nelle reti stradali e ferroviarie hanno

destato negli ultimi anni un interesse sempre crescente da parte della comunità scientifica. Tali studi sono stati frequentemente condotti secondo le ben note modalità e fasi dell'analisi del rischio [2]; questa metodologia, anche se storicamente affetta da un carattere semi-qualitativo, ha avuto il grande merito di introdurre un approccio di "area vasta" per le diverse problematiche via via affrontate, facendo emergere la necessità di una gestione generalizzata di grandi quantità di dati, da acquisire, elaborare ed, infine, rappresentare opportunamente. In quest'ottica, non sono più sufficienti esclusivamente studi di settore (tipici dell'ingegneria sismica, strutturale e geotecnica), orientati, ad esempio, alla più realistica modellazione del comportamento sismico di una singola struttura ma, è necessario estendere questo tipo di valutazioni ad ambiti territoriali più vasti. In tal caso, risulta indispensabile adottare un approccio multidisciplinare, basato sul contributo specifico di distinti settori scientifici. In tal senso, la geomatica, intesa come scienza delle più moderne tecnologie per l'acquisizione e gestione di informazione geografica, si pone come una disciplina trasversale per numerose tematiche relative al territorio ed all'ambiente, per cui assume certamente un ruolo fondamentale nell'ambito dei suddetti processi.

Per tali motivazioni è nata da qualche anno, all'interno del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Catania, una collaborazione scientifica tra due gruppi di ricerca, che hanno operato rispettivamente nei settori dell'ingegneria geotecnica e della geomatica. Il presente lavoro si inserisce in tale ambito, con l'obiettivo di strutturare ed implementare un SIT "specializzato" sulla valutazione del rischio sismico di frana nel territorio della provincia di Catania. L'esigenza di tale collaborazione è emersa durante i lavori che hanno riguardato il progetto di ricerca "*Scenari dettagliati e provvedimenti finalizzati alla prevenzione sismica nell'area urbana di Catania*" finanziato dal CNR-GNDT tramite l'INGV, e finalizzato alla zonazione del rischio sismico nel territorio Catanese. Nell'ambito del lavoro è stata sviluppata una procedura per l'analisi degli effetti di un evento sismico di riferimento sulla funzionalità post-sismica delle principali reti viarie, con l'obiettivo di individua-

re le zone potenzialmente soggette a fenomeni di instabilità e i tronchi stradali potenzialmente interessati da tali fenomeni [3]. La procedura proposta si basa su un'applicazione del metodo degli spostamenti [4] alle aree in pendio presenti nel territorio, approccio che ha già avuto in passato interessanti applicazioni [5,6].

Con riferimento a differenti scenari sismici, si è proceduto alla valutazione della distribuzione spaziale degli spostamenti permanenti indotti nell'area di studio e, utilizzando correlazioni di carattere empirico, ad una valutazione della distribuzione spaziale del corrispondente danno. Questo tipo di analisi è tradizionalmente condotto su aree ridotte, a causa della difficoltà di acquisire, gestire ed elaborare grandi quantità di dati eterogenei e indispensabili per un'accurata modellazione. Per consentire l'applicazione di queste metodologie anche ad aree più estese, è indispensabile l'uso di strumenti avanzati in grado di gestire ed elaborare un grande numero di dati spaziali e, in tal senso, un software GIS rappresenta l'ambiente di lavoro ottimale, per le notevoli potenzialità di automazione dei processi.

2. Implementazione del SIT specializzato

La procedura implementata in ambiente GIS fa utilizzo di numerose elaborazioni che necessitano di una struttura dati articolata, in grado, cioè, di garantire un adeguato supporto sia dal punto di vista puramente informativo (archiviazione dei dati), sia ai fini dell'applicazione dei modelli matematici da utilizzare per le valutazioni. D'altra parte, affinché le modellazioni conducano a risultati affidabili è indispensabile disporre di banche dati geografiche dettagliate, sia dal punto di vista cartografico (grandi scale) sia dal punto di vista informativo (qualità e precisione delle informazioni associate). Sulla base di queste considerazioni, nel presente lavoro si propone il modello di un SIT "specializzato" a grande scala cartografica, orientato esclusivamente a finalità specifiche e, pertanto, strutturato solo ai fini dell'archiviazione di dettaglio e dell'elaborazione dei contenuti informativi necessari. Si tratta dunque di una struttura dati tematica di dettaglio, che si pone, sotto certi aspetti, in contrapposizione con l'utopia del SIT glo-

bale, inteso come unico destinatario di tutto il patrimonio informativo territoriale. Questa visione, pur affascinante, risulta infatti inapplicabile ai fini pratici, dato che non si dispone mai di risorse infinite e, quindi, si è sempre costretti a porre limiti all'estensione delle aree studiate, alla relativa scala e ai contenuti informativi. Anche in questo senso, porre obiettivi specifici già nella fase di progettazione di un qualsiasi SIT, assume una valenza particolarmente importante. L'introduzione di SIT specializzati non deve, comunque, essere intesa come antitetica nei confronti di SIT di carattere generale, ma, al contrario, tali sistemi sono concepiti per essere coordinati e reciprocamente relazionati. In tal modo, immaginando numerose implementazioni specializzate opportunamente relazionate a strutture dati di carattere generale, è possibile raggiungere un importante risultato: la coesistenza di informazione geografica tematica di grande dettaglio all'interno di un'architettura dati generale di piccola scala. In altri termini, un prodotto effettivamente realizzabile che, nel suo complesso, si avvicina molto all'idea del SIT globale di cui sopra si è detto.

Una struttura dati dedicata esclusivamente a tematiche specifiche ed articolata su contenuti di dettaglio, consente inoltre di razionalizzare l'impiego delle risorse sfruttando pienamente le potenzialità di elaborazione dei GIS ed operando secondo tecniche e modelli anche molto sofisticati, che, nelle tradizionali applicazioni non informatizzate, hanno trovato riscontri applicativi molto limitati. Ad esempio, proprio a causa della complessità delle elaborazioni da effettuare e della grande quantità ed eterogeneità dei dati richiesti, le modellazioni geotecniche utilizzate nell'ambito del presente lavoro sono state tradizionalmente applicate solo nell'ambito di studi estremamente localizzati, con riferimento a singoli versanti o a zone di ridotta estensione. L'implementazione nel GIS, sfruttando le potenzialità di calcolo del sistema e l'efficienza dalla struttura dati dedicata, ha permesso invece di estendere questa tipologia di approcci anche ad aree molto più estese, senza alterare il dettaglio richiesto nei dati di input e l'affidabilità locale dei risultati ottenuti. In tal modo si è dunque realizzato il duplice vantaggio di disporre di elaborazioni di grande dettaglio su aree molto estese.

3. Area di studio e terremoto di riferimento: fonti dati e strumenti utilizzati

L'area di studio corrisponde al territorio della Provincia Regionale di Catania, con una estensione di circa 3415 km², e si colloca nella Sicilia orientale in una delle zone a più elevato rischio sismico del Mediterraneo. La conformazione morfologica e geologica è molto differenziata e varia da ampie zone alluvionali pianeggianti (Piana di Catania) ad aree estremamente tormentate ed acclivi, con angoli di pendio anche molto elevati (>65°), tipiche della più recente attività vulcanica dell'Etna.

Nell'ambito del presente lavoro sono state effettuate approfondite ed estese ricerche per disporre di tutti i dati necessari alle valutazioni, con particolare riferimento alla sismologia storica ed al contesto geologico, geotecnico e topografico di ciascun sito.

Un aspetto molto delicato ha riguardato la definizione dello scenario sismico di riferimento. Analizzando la storia sismica dell'area, le fonti più autorevoli concordano nell'indicare come evento sismico di riferimento il catastrofico terremoto che colpì la Sicilia orientale nel 1693, già assunto come scenario di riferimento nell'ambito di due progetti di ricerca finanziati dal Gruppo Nazionale Ricerca sui Terremoti (GNDT) del CNR e finalizzati allo studio ed alla mitigazione del rischio sismico nella città di Catania [7]. Per l'evento del 1693 sono state stimate un'intensità MCS pari a XI ed una magnitudo Richter pari a 7.3; la più probabile posizione dell'epicentro, è stata localizzata lungo la scarpata Ibleo-Maltese ad una distanza di circa 13 km dalla linea di costa della città di Catania. Per le modellazioni proposte nel lavoro, è stato necessario georeferenziare accuratamente la posizione di tale epicentro sulle cartografie di riferimento.

Relativamente ai dati geologici sono stati utilizzati alcuni database relativi alle principali caratteristiche geologiche dell'area comunale di Catania realizzati con i dati di numerosi sondaggi effettuati durante le prime fasi del progetto di ricerca. Inoltre è stata utilizzata una cartografia vettoriale della litologia estesa a tutto il territorio provinciale, ottenuta attraverso documenti disponibili in letteratura. Nel database associato a tale cartografia le diverse formazioni superficiali sono classificate secondo 36 distinte unità litologiche, mentre i parametri geotecnici che caratterizzano le differenti unità sono stati desunti da risultati di indagini in sito e in laboratorio o, in mancanza di tali informazioni, da dati disponibili in letteratura. Per le unità in cui i dati disponibili sono risultati caratterizzati da significative dispersioni, sono stati definiti valori massimi, minimi e medi reiterando le analisi con i tre distinti riferimenti.

Numerose altre informazioni sui siti presenti nell'area oggetto di studio sono state reperite da alcuni studi sviluppati nell'ambito del progetto di ricerca in cui il presente lavoro si colloca [8,9,10]. Infine, relativamente alle condizioni idrauliche dei siti presenti nel database implementato, i dati raccolti non sono risultati sufficienti per la definizione di un'affidabile modello di calcolo. Di conseguenza, come più ampiamente descritto nel seguito, le analisi sono state eseguite analizzando differenti condizioni idrauliche limite. Ai fini delle successive modellazioni in ambiente GIS i dati geo-litologici sono stati ulteriormente ri-classificati, in funzione caratteristiche fisiche e meccaniche di ciascuna unità, in appositi tematismi di tipo GRID, tutti con celle di 40 m.

Relativamente alla cartografia, è stata utilizzata la nuova carta della Provincia di Catania, disponibile in formato vettoriale DWG alla scala nominale 1:10000 e riferita ad un volo del 1999. Da questa fonte, attraverso opportune elaborazioni, sono state successivamente estratte e convertite in formato shape (SHP) tutte le componenti cartografiche che costituiscono i tematismi vettoriali di maggiore interesse per le finalità del lavoro: la rete viaria principale extraurbana in funzione della differente gerarchia amministrativa, l'ubicazione e l'estensione dei diversi centri urbani. Per quel che riguarda l'altimetria è stato utilizzato un DTM (Digital Terrain Model) disponibile, con il taglio della cartografia alla scala 1:10000, in formato GRID con risoluzione di 40 m per pixel. Per consentire maggiore semplicità operativa nelle successive fasi di elaborazione si è ritenuto opportuno procedere alla mosaicatura delle 116 sezioni di DTM disponibili, generando in tal modo un unico GRID di riferimento per le quote di tutta la provincia, costituito circa da sei milioni di celle. Nella figura 1 è mostrata una carta tematica del DTM così ottenuto insieme alla posizione georeferenziata dell'epicentro definito per l'evento di scenario. Nella figura 2 è

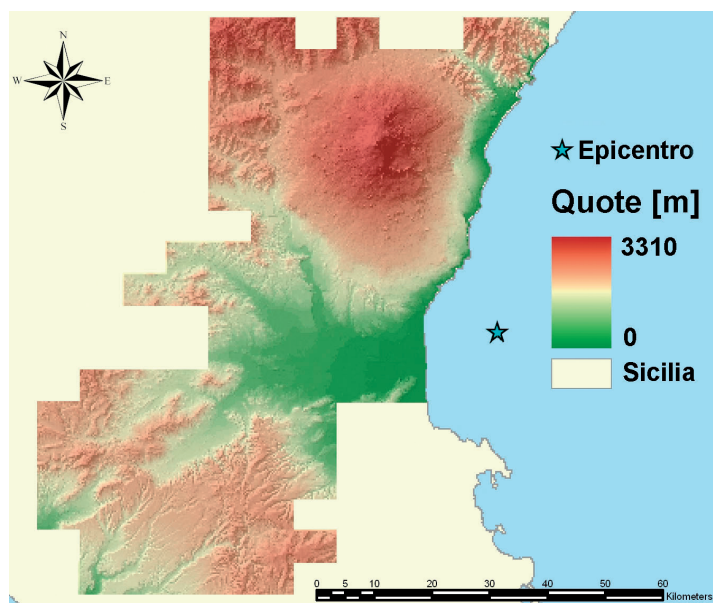
riportata una rappresentazione tridimensionale del DTM realizzata mediante l'applicativo ArcScene del pacchetto ArcGIS.

Per quanto riguarda l'ambiente di lavoro, l'intera procedura proposta è stata sviluppata ed implementata su PC di ordinarie caratteristiche hardware (processore Pentium 4 a 2,8 Ghz, 1Gb di memoria RAM) e su piattaforma software ESRI ArcGIS v.8.3, dotato delle estensioni Spatial Analyst e 3D Analyst, le cui funzionalità sono risultate indispensabili per la maggior parte delle elaborazioni effettuate. A titolo di esempio la figura 3 mostra la carta delle pendenze ottenuta mediante la funzione *derive slope* dello Spatial Analyst e, come descritto nel seguito, utilizzata per la valutazione delle condizioni di stabilità statica e sismica delle aree in pendio.

4. Scenario sismico e modellazioni geotecniche: implementazione nel SIT e mappe dei risultati

Facendo riferimento all'evento del 1693 precedentemente descritto, la definizione dello scenario sismico è stata effettuata mediante un approccio di natura deterministica basato sull'utilizzo di leggi di attenuazione dei valori di picco dell'accelerazione (*PGA*) e della velocità (*PGV*) al suolo. Le leggi disponibili in letteratura a tal proposito sono ottenute per via statistica e consistono in relazioni di correlazione tra parametri sismici che descrivono sinteticamente un evento, parametri geometrici che descrivono la posizione di un sito rispetto alla sorgente sismica e, infine, parametri che descrivono la natura del suolo dal punto di vista geotecnico-sismico. L'attendibilità di tali leggi di correlazione è legata alle caratteristiche del database di registrazioni sismiche di riferimento ed al modello matematico adottato per sviluppare la correlazione stessa.

Figura 1 – Carta tematica delle quote del terreno (DTM) e georeferenziazione dell'epicentro per l'evento di scenario.



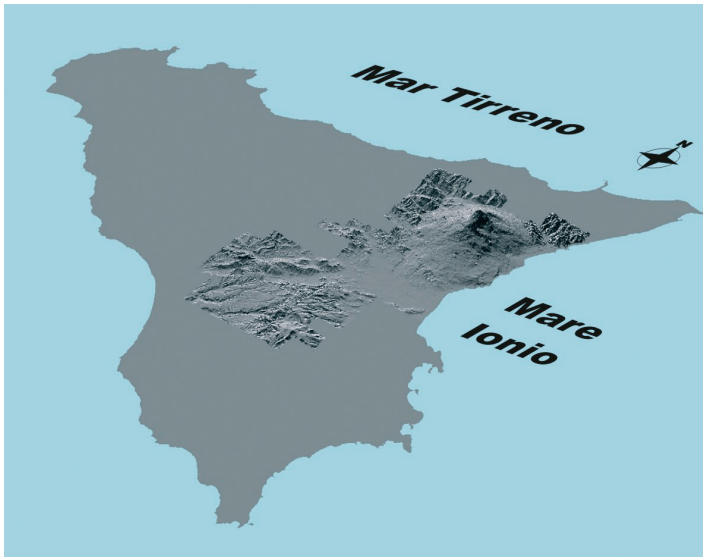


Figura 2 – Rappresentazione 3D del DTM del territorio della Provincia di Catania sovrapposto ad una carta planimetrica della Sicilia (fattore di moltiplicazione delle quote=3).

Per gli scopi del presente studio, tra i numerosi modelli disponibili in letteratura ne sono stati selezionati alcuni ritenuti affidabili relativamente all'area in esame. La tabella 1 riporta sinteticamente alcune delle principali caratteristiche dei modelli utilizzati. La scelta di tali modelli è stata dettata da un'analisi delle caratteristiche dei rispettivi database di registrazioni sismiche. Il numero di eventi presi in esame in ognuno dei database è tale da rendere affidabile un'analisi di tipo statistico; inoltre, gli eventi presi in esame fanno riferimento a terremoti verificatisi in zone sismogenetiche di caratteristiche simili a quelle relative all'area oggetto di studio; infine, in alcuni casi, i database contengono buona parte delle registrazioni sismiche attualmente disponibili per l'area della Sicilia Orientale.

I modelli presi in esame consentono la definizione di uno scenario sismico in termini di PGA e/o PGV attraverso la distanza epicentrale R , espressa in km , e uno (S) o più parametri (S_A, S_S) che descrivono la natura del suolo in relazione al valore medio $V_{S,30}$ della velocità delle onde di taglio valutato nei primi 30 m e/o alla profondità H del deposito. In particolare, il parametro S assume i seguenti valori: $S=0$ per depositi rigidi ($V_{S,30} > 800 m/s$) e depositi alluvionali profondi ($H > 20m, 400 m/s \leq V_{S,30} \leq 800 m/s$); $S=1$ per depositi alluvionali superficiali ($5 < H < 20m, 400 m/s \leq V_{S,30} \leq 800 m/s$). I parametri S_A e S_S fanno riferimento alle classi di suolo definite dall'Eurocodice 8: $S_A = S_S = 0$ per $V_{S,30} > 750 m/s$, $S_A = 1$ e $S_S = 0$ per $360 m/s \leq V_{S,30} \leq 750 m/s$, $S_A = 0$ e $S_S = 1$ per $V_{S,30} < 360 m/s$.

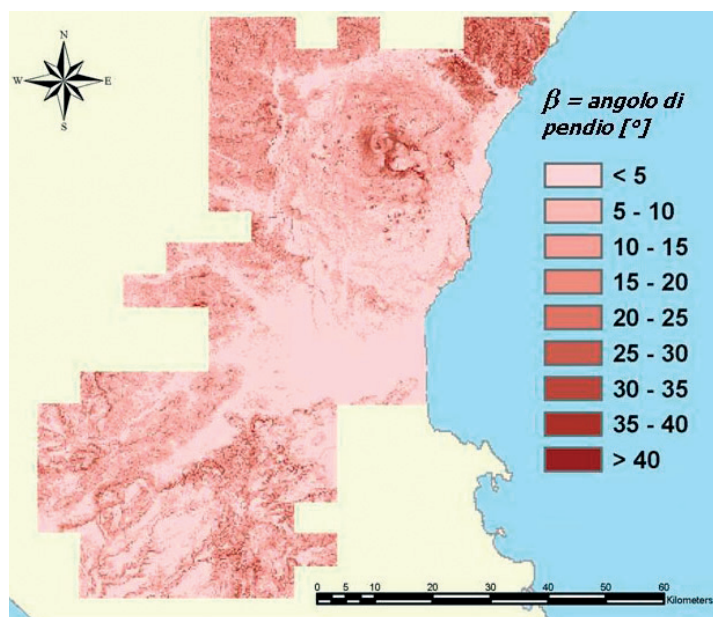


Figura 3 – Carta tematica degli angoli di pendio ricavata dal DTM mediante Spatial Analyst

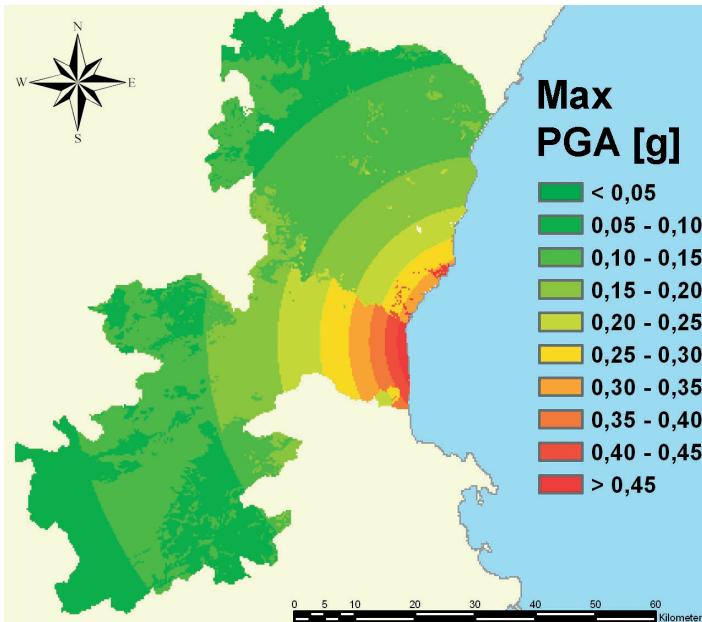
Tabella 1 - Modelli di attenuazione presi in esame nello studio.

Modello	Caratteristiche principali dei database di riferimento							
	Area	N	C	M	R (km)	S	SM	$\sigma_{\log PGA} / \sigma_{\log PGV}$
Sabetta & Pugliese (1987)	Italia	17	190	4.6-6.8	1.5-180	Roccia, terreni	Non noto	0.173 / 0.215
$\log PGA = -1.562 + 0.306 \cdot M - \log \sqrt{R^2 + 5.8^2} + 0.169 \cdot S$ $\log PGV = 0.710 + 0.455 \cdot M - \log \sqrt{R^2 + 3.6^2} + 0.133 \cdot S$								
Ambraseys et al. (1996)	Europa e medio oriente	157	422	4.0-7.9	0-260	Roccia, terreni rigidi, terreni soffici	Non noto	0.250
$\log PGA = 1.512 + 0.266 \cdot M + 0.922 \cdot \log \sqrt{R^2 + 3.5^2} + 0.117 \cdot S_A + 0.124 \cdot S_S$								
Spudich et al. (1999)	Varie zone del mondo	39	142	5.1-7.2	0-99.4	Roccia, terreni	Normal, Reverse	0.203
$\log PGA = 0.299 + 0.229 \cdot (M - 6) - 1.052 \cdot \log \sqrt{R^2 + 7.2^2} + 0.112 \cdot S$								
Tromans & Bommer (2000)	Europa	51	249	5.5-7.9	1-359	Roccia, terreni rigidi, terreni soffici	Non noto	0.270
$\log PGA = 2.080 + 0.214 \cdot M + 1.049 \log \sqrt{R^2 + 7.2^2} + 0.058 \cdot S_A + 0.085 \cdot S_S$								
Bommer et al. (2000)	Europa e medio oriente	157	422	5.6-7.9	1-359	Roccia, terreni rigidi, terreni soffici	Non noto	0.270
$\log PGV = -0.195 + 0.390 \cdot M - 1.074 \cdot \log \sqrt{R^2 + 4.5^2} + 0.142 \cdot S_A + 0.185 \cdot S_S$								

N: numero di eventi; C: numero di componenti; M: magnitudo; R: distanza sito-sorgente; S: natura del sito; SM: meccanismo sorgente; $\sigma_{\log PGA/PGV}$: deviazione standard del modello

Per l'implementazione dei modelli nell'ambito del SIT, si è utilizzata la funzione *raster calculator* dello Spatial Analyst; la funzione, attraverso opportuna sintassi, è in grado di elaborare una qualsiasi formulazione analitica ed applicarla in base ai valori delle celle dei tematismi GRID utilizzati. Nella fattispecie, i tematismi GRID di riferimento sono stati quelli relativi ai parametri di caratterizzazione dei terreni (S , S_A , S_S) e quello (R) relativo alle distanze epicentrali. Relativamente a quest'ultimo, è stata utilizzata la funzione *distance:straight line* dello Spatial Analyst, che restituisce un GRID in cui il valore di ogni cella è pari alla distanza diretta del baricentro della stessa da punti selezionati di un altro tematismo vettoriale; in questo caso il punto selezionato è stato l'epicentro mostrato nella figura 1. I risultati delle elaborazioni effettuate mediante il *raster calculator* rappresentano nuovi tematismi GRID, i cui valori delle celle sono i valori di PGA e di PGV calcolati. Poiché i diversi modelli utilizzati (Tabella 1) hanno fornito risultati leggermente differenti dal punto di vista numerico, si è ritenuto utile fare riferimento a due ulteriori GRID generati, attraverso specifiche funzioni di zonal statistic sulle celle, utilizzando il massimo (PGA_{max}) e la media (PGA_{med}) tra i valori valutati con determinati con i singoli modelli. La figura 4, mostra i risultati così ottenuti in termini di valore massimo di PGA (PGA_{max}), evidenziando valori anche superiori a 0.45 g in prossimità della linea di costa della città di Catania.

Figura 4 – Carta tematica dei valori massimi del parametro PGA .



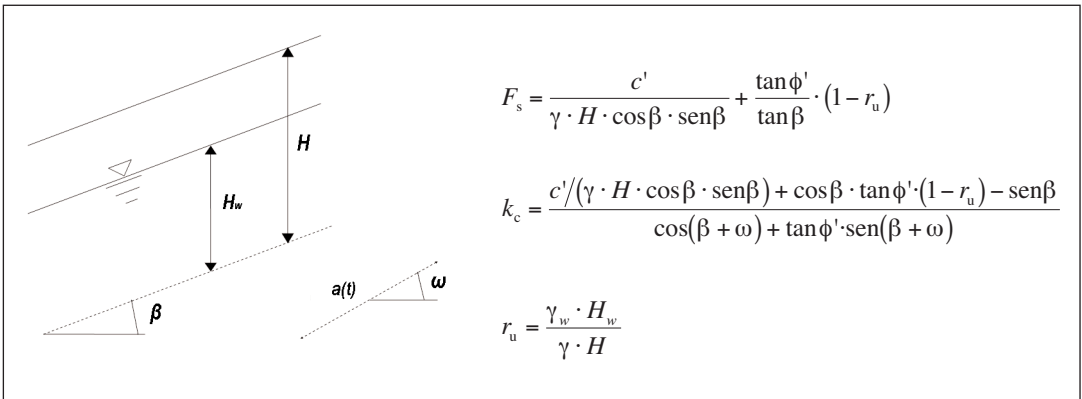
Definito lo scenario sismico è necessario disporre di uno strumento che consenta di valutare gli effetti del moto sismico sulle condizioni di stabilità delle aree in pendio presenti nel territorio in esame. Tale valutazione rappresenta un complesso problema di dinamica dei terreni che può essere affrontato con metodologie differenti per ciò che attiene l'accura-

tezza della modellazione, la complessità computazionale e l'affidabilità dei risultati ottenuti.

Per quanto concerne i pendii naturali, la valutazione degli effetti di un evento sismico è spesso effettuata utilizzando il metodo degli spostamenti proposto da Newmark [4]. Tale approccio, tra i differenti presenti in letteratura, rappresenta il miglior compromesso tra l'accuratezza del risultato ottenuto, il livello di caratterizzazione geotecnica richiesto dall'analisi e la definizione di un affidabile input sismico. Nell'ambito del metodo, la massa di terreno potenzialmente in frana è assimilata ad un corpo rigido in equilibrio dinamico sotto azioni destabilizzanti, (peso del terreno, eventuali sovraccarichi agenti sul pendio, azioni inerziali di natura sismica) e azioni stabilizzanti fornite dalla resistenza al taglio del terreno disponibile lungo una data superficie di potenziale scorrimento. Il problema è risolto mediante il metodo dell'equilibrio limite. La massa di terreno instabile permane in equilibrio fin tanto che le azioni stabilizzanti non sono vinte da quelle destabilizzanti, ovvero fin tanto che il valore del fattore di sicurezza sismico del pendio rimane superiore all'unità. Quando, per effetto dell'incremento delle azioni inerziali di natura sismica o per la riduzione della resistenza al taglio del terreno, il fattore di sicurezza scende sotto l'unità, la massa di terreno subisce spostamenti permanenti a causa delle accelerazioni cui è soggetta per effetto delle forze non più equilibrate. Il valore dell'accelerazione sismica per cui il pendio è in condizione di equilibrio limite è definito *accelerazione critica*. Il moto relativo della massa di terreno instabile rispetto alla sottostante formazione stabile si instaura quando l'accelerazione relativa supera, per la prima volta, il valore critico. Da tale istante il pendio inizierà ad accumulare spostamenti permanenti fin tanto che l'accelerazione sismica, invertendosi di segno, annullerà la velocità della massa in frana. Il moto riprenderà con le stesse modalità quando l'accelerazione sismica cui la massa è sottoposta supererà nuovamente il valore critico. Al termine dell'eccitazione sismica, il valore finale dello spostamento cumulato rappresenta, nell'ambito dello spirito del metodo, lo spostamento permanente subito dal pendio per effetto dell'evento sismico preso in esame nell'analisi. Il valore dello spostamento così valutato può considerarsi un indice delle condizioni di stabilità durante l'evento sismico e può

essere utilizzato per formulare un giudizio sulla funzionalità in fase post-sismica del pendio stesso e delle eventuali strutture o infrastrutture potenzialmente coinvolte in un fenomeno di frana. Infine, nell'ambito di un'analisi eseguita a larga scala, la valutazione della distribuzione sul territorio degli spostamenti permanenti indotti può essere utilizzata per definire scenari di danno sulle reti infrastrutturali poste nelle vicinanze delle zone soggette a fenomeni di instabilità e, di conseguenza, può costituire un utile strumento nelle operazioni di gestione o pianificazione dell'emergenza sismica.

Il valore dell'accelerazione critica di un pendio dipende dal meccanismo di collasso assunto, dalle caratteristiche geometriche del pendio e dalle caratteristiche meccaniche del terreno. Nelle applicazioni effettuate nell'ambito del presente lavoro si farà riferimento al meccanismo di pendio indefinito. Indicando con c' , f' e g rispettivamente la coesione efficace, l'angolo di resistenza al taglio e il peso dell'unità di volume del terreno e con w l'inclinazione dell'azione sismica rispetto all'orizzontale, le espressioni del fattore di sicurezza statico F_s e dell'accelerazione critica k_c del pendio sono quelle mostrate nella figura 5 insieme allo schema geometrico di riferimento; l'accelerazione critica è espressa come frazione dell'accelerazione di gravità. Nel definire i parametri F_s e k_c si è fatto utilizzo del coefficiente di pressione interstiziale r_u che descrive le condizioni idrauliche del pendio e la cui espressione è riportata in figura 5. Poiché i dati raccolti non hanno permesso una accurata definizione delle condizioni idrauliche dei siti da esaminare, le valutazioni necessarie per le analisi di stabilità statica e sismica sono state effettuate facendo riferimento ad una variazione parametrica del coefficiente di pressione interstiziale. I risultati mostrati nel presente lavoro sono relativi alle elaborazioni effettuate per $r_u = 0$ e $r_u = 0.5$ corrispondenti, rispettivamente, ad una superficie piezometrica posta al di sotto della superficie di scorrimento o alla quota del piano campagna. Nelle applicazioni che saranno sviluppate nel seguito sarà assunto, relativamente all'angolo ω , il valore critico $\omega_{cr} = \phi' - \beta$ per il quale è facile dimostrare che il valore dell'accelerazione critica risulta minimo, consentendo, quindi, una stima cautelativa degli spostamenti permanenti indotti.



Dal punto di vista computazionale il procedimento numerico necessario per la valutazione dello spostamento permanente consta di un processo di integrazione che richiede la conoscenza di una storia delle accelerazioni sismiche imposte al pendio e del valore k_c . Benché tale procedimento non sia particolarmente complesso, per la sua applicazione su vasta scala sarebbe necessaria la definizione puntuale di una storia delle accelerazioni sismiche al suolo. A causa della complessità di tale valutazione, nelle applicazioni a larga scala si fa solitamente uso dei cosiddetti metodi degli spostamenti semplificati.

Tali metodi rappresentano relazioni di correlazione sviluppate attraverso un procedimento di natura statistica che può essere così sintetizzato: applicando il metodo degli spostamenti nella sua formulazione integrale ad un database di registrazioni sismiche è possibile ottenere un database di valori dello spostamento permanente cumulato per ognuno dei valori dell'accelerazione critica adottato nel procedimento di integrazione; attraverso un approccio di natura statistica è possibile correlare ognuno dei valori dello spostamento valutato con il corrispondente valore dell'accelerazione critica e con uno o più parametri sismici che descrivono sinteticamente la storia delle accelerazioni adottata nel procedimento di integrazione. L'attendibilità dei modelli ottenuti è, ovviamente, legata alle caratteristiche ed all'assortimento del database di registrazioni adottate ed alle caratteristiche dei parametri sismici con cui è sinteticamente definita la storia delle accelerazioni. Relativamente all'implementazione SIT, anche in questo caso utilizzando la funzione *raster calculator* dello *Spatial Analyst*, sono state elaborate le formulazioni analitiche del fattore di sicurezza statico F_s e dell'accelerazione critica k_c riportate nella figura 5 utilizzando tutti i parametri GRID necessari (c' , ϕ' , γ , β , r_u). Tali operazioni hanno riguardato solamente le celle per le quali l'angolo di pendio β è risultato superiore a 5° , soglia assunta come valore limite per la validità della modellazione geotecnica adottata. La figura 6 mostra i risultati ottenuti in termini di accelerazione critica k_c per il caso $r_u = 0,5$.

Figura 5 – Schema di pendio indefinito e espressioni del fattore di sicurezza statico e dell'accelerazione critica.

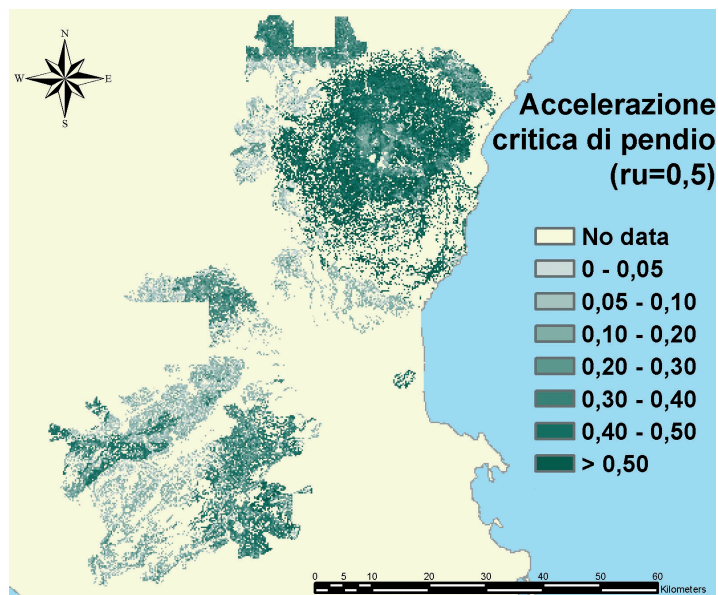


Figura 6 – Carta tematica delle accelerazioni critiche [g] per il caso $r_u = 0,5$.

Passo successivo dell'analisi è stata l'individuazione delle porzioni del territorio potenzialmente soggette a fenomeni di instabilità. Nell'ambito dello spirito del metodo degli spostamenti e facendo riferimento all'implementazione SIT proposta, tale valutazione è effettuata individuando le celle del modello per le quali il rapporto tra il valore dell'accelerazione critica k_c e il valore massimo dell'accelerazione sismica imposta risulta inferiore all'unità. I risultati di tale valutazione sono riportati nella figura 7 per la condizione $r_u = 0,5$. Nei calcoli si è fatto riferimento ai valori di PGA mostrati nella figura 4 e si è indicato con k_{max} il rapporto tra il valore massimo dell'accelerazione sismica al suolo (PGA) e l'accelerazione di gravità. Le celle del modello evidenziate in rosso rappresentano le porzioni del territorio in cui è possibile l'insorgere di spostamenti permanenti. Solo su queste ultime celle verrà applicata l'ultima parte della modellazione geotecnica, orientata alla valutazione degli spostamenti permanenti indotti.

I metodi degli spostamenti semplificati disponibili in letteratura sono numerosi; per le applicazioni effettuate nell'ambito del presente lavoro ne sono stati selezionati alcuni individuando dapprima modelli che facessero riferimento agli stessi parametri sismici con i quali è stato definito lo scenario sismico e selezionando, successivamente, i modelli ritenuti più affidabili per quanto riguarda la loro formulazione analitica e le caratteristiche dei rispettivi database di registrazioni. La tabella 2 mostra le caratteristiche principali di ognuno dei modelli individuati insieme ad una descrizione sintetica dei rispettivi database.

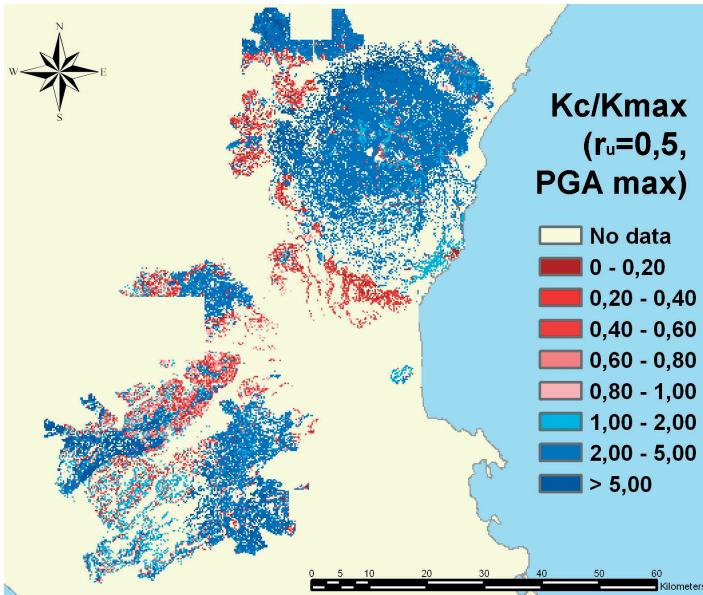


Figura 7 – Mappa delle aree potenzialmente instabili.

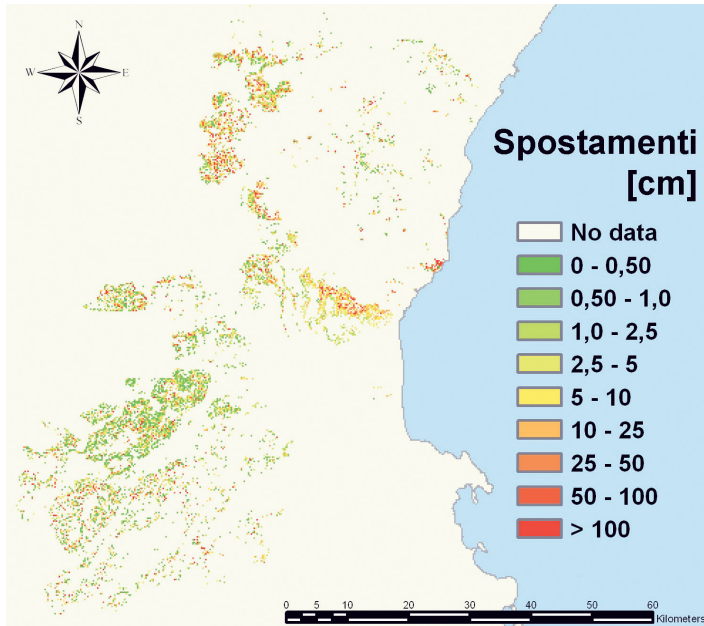
Tabella 2 - Modelli per il calcolo degli spostamenti permanenti presi in esame nello studio.

Modello	Caratteristiche del modello e del relativo database di registrazioni sismiche						
	N	C	M	R (kM)	S	P	$\sigma_{\log d}$
Ambraseys & Menu (1988)	11	50	5.5-7.7	9-20	-	k_c/k_{max}	0.30
$\log d = -1.281 + 0.648 \cdot M - 0.934 \cdot \log \sqrt{R_e^2 + 3.5^2} - 3.699 \cdot \frac{k_c}{k_{max}} + 0.225 \cdot S$							
Ambraseys & Srbulov (1995)	76	532	5.0-7.7	-	-	$k_c/k_{max}, M_s, R$	0.42
$\log d = 9.2 \cdot \frac{PGV^2}{g \cdot k_{max}} \cdot \exp\left(-5.87 \cdot \frac{k_c}{k_{max}}\right) \cdot \left(\frac{k_c}{k_{max}}\right)^{-0.49}$							
Cai & Bathurst (1996)	3	16	6.4-7.1	3-35	-	$-k_c/k_{max}, PGV, PGA$	-
$\log d = 0.90 + \log\left(1 - \frac{k_c}{k_{max}}\right)^{2.53} \cdot \left(\frac{k_c}{k_{max}}\right)^{-1.09}$							
Romeo (2000)17	190	4.6-6.8	1.5-180	Roccia, terreni		$k_c/k_{max}, M_s, R$	0.58
$\log d = -2.41 + 0.47M - 0.01 \cdot \log \sqrt{R^2 + h^2} + \log\left[\left(1 - \frac{k_c}{k_{max}}\right)^{2.91} \left(\frac{k_c}{k_{max}}\right)^{-1.02}\right]$							

N: numero di eventi; C: numero di componenti; M: magnitudo; R: distanza sito-sorgente; S: natura del sito; P: parametri presenti nel modello; $\sigma_{\log d}$: deviazione standard del modello. Lo spostamento d è espresso in cm

Anche in questo caso si è ricorsi all'implementazione dei modelli analitici attraverso il *raster calculator* dello Spatial Analyst. Complessivamente sono state effettuate sedici elaborazioni, in relazione alle due differenti condizioni idrauliche limite ($r_u = 0$ ed $r_u = 0,5$), alle due distinte ipotesi di scenario sismico (PGA_{max} e PGA_{med}) ed ai quattro modelli di calcolo descritti nella tabella 2. A titolo di esempio, la figura 8 mostra i risultati ottenuti con il modello di Ambraseys & Menu (1988) facendo riferimento al valore massimo dell'accelerazione sismica PGA_{max} ed alla condizione $r_u = 0,5$.

Figura 8 – Spostamenti permanenti valutati con il modello di Ambraseys & Menu (1988) per lo scenario PGA_{max} e $r_u = 0,5$.



5. Sintesi dei risultati e proposta di abachi di valutazione della distribuzione del danno

Le diverse distribuzioni spaziali degli spostamenti valutate per i differenti scenari sismici ipotizzati e per le due differenti condizioni idrauliche limite, sono state analizzate allo scopo di determinare strumenti che consentano di sintetizzarne il significato in termini di estensione delle aree soggette a fenomeni di instabilità e valutazione del danno arrecato alle infrastrutture presenti nelle aree stesse.

La definizione di un legame diretto danno-spostamento, non è un'operazione facile per la complessità dei parametri che entrano in gioco, per l'ovvia dipendenza della correlazione dalle caratteristiche funzionali della struttura geotecnica cui l'analisi è riferita e, infine, per la soggettività del giudizio sugli effetti prodotti dagli spostamenti del pendio. Per questi motivi, nel proseguo del lavoro saranno prese in esame due correlazioni danno-spostamenti, disponibili nella letteratura tecnica e validate da osservazioni in sito. La tabella 3 riporta le caratteristiche delle due correlazioni prese in esame.

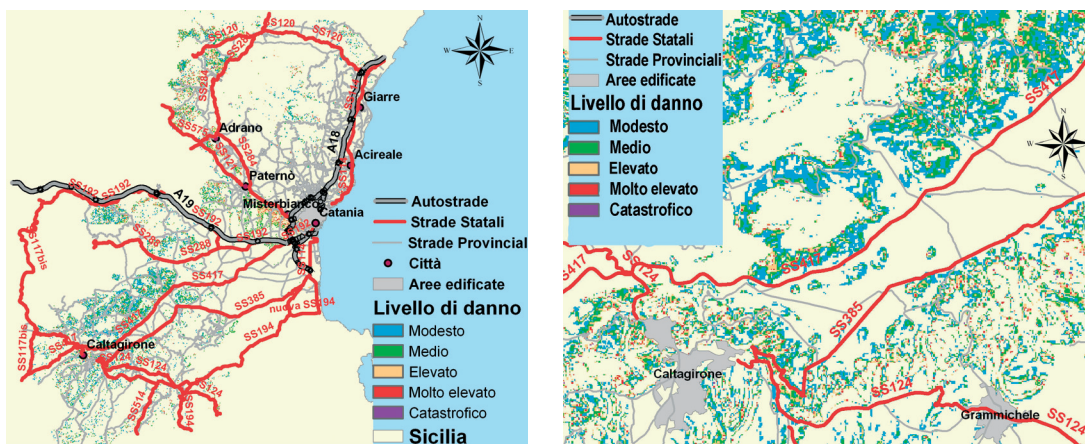
Tabella 3 - Correlazioni danno-spostamenti prese in esame nello studio.

Classe di danno	Livello di danno	Legg et al. (1982)	Idriss (1985) *
I	Modesto	$d < 0.5 \text{ cm}$	$d < 3 \text{ cm}$
II	Medio	$0.5 \text{ cm} < d < 5 \text{ cm}$	$d < 15 \text{ cm}$
III	Elevato	$5 \text{ cm} < d < 50 \text{ cm}$	$d < 30 \text{ cm}$
IV	Molto elevato	$50 \text{ cm} < d < 500 \text{ cm}$	$d < 90 \text{ cm}$
V	Catastrofico	$d < 500 \text{ cm}$	$d < 300 \text{ cm}$

(*): Correlazione adottata dall'Alaska Geotechnical Evaluation Criteria Committee

Utilizzando tali correlazioni, per ognuna delle analisi eseguite, sono state determinate, attraverso la funzione *reclassify cell*, le distribuzioni spaziali del danno correlato agli spostamenti permanenti indotti nelle aree soggette ai fenomeni di instabilità (cfr. figura 7).

Figura 9 – Esempi di mappe della distribuzione del danno valutate mediante la correlazione di Legg et al. (1982).



A titolo di esempio le figure 9 mostrano la distribuzione generale ed un dettaglio della mappa del danno valutata utilizzando la correlazione di Legg et al. (1982) con riferimento alla distribuzione degli spostamenti ottenuta mediante il modello di Romeo (2000) nelle ipotesi PGA_{max} e $r_u = 0,5$. La sovrapposizione delle mappe alla rete viaria dell'area in esame è stata ottenuta mediante operazioni di overlay topologico.

Le mappe così ottenute rappresentano utili strumenti mediante i quali, per ogni zona del territorio investigato, è possibile individuare l'eventuale perdita di funzionalità di alcuni tronchi della rete viaria e, contestualmente, fornire un giudizio sull'entità del danno arrecato dal fenomeno di instabilità verificatosi. Tale tipo di analisi può ovviamente essere estesa a tutte le zone presenti nel territorio esaminato e può essere effettuata a differenti scale di lavoro. A tal proposito è opportuno sottolineare che il livello di dettaglio dell'applicazione proposta raggiunge la risoluzione di 40 m per ciascuna cella, ma, disponendo di cartografie e di DTM di scala maggiore è possibile spingere l'accuratezza delle indagini verso dettagli ancora superiori.

Ulteriore potenzialità delle mappe ottenute è la possibilità di individuare gli eventuali punti nevralgici che la rete viaria presenta nelle immediate condizioni post-sismiche, ovvero la possibilità di riconoscere e delimitare le porzioni della rete eventualmente interessata da fenomeni di instabilità e, pertanto, in parte o totalmente inagibile. In ultima analisi, tramite gli strumenti sviluppati è possibile formulare un giudizio globale sugli effetti che eventuali fenomeni di instabilità possono avere sulla funzionalità post-sismica della rete e utilizzare i risultati ai fini della pianificazione dei soccorsi. In tal senso si individuano nuove potenzialità di approccio alla problematica della gestione dell'emergenza; tale approccio è basato sulla possibilità di effettuare una preventiva pianificazione in relazione ai rischi calcolati per i diversi scenari ipotizzati e realizzare, nelle immediate fasi post-evento, affidabili scenari di danno, fondamentali per la ottimale gestione delle risorse (sempre limitate) in emergenza.

Nell'ambito di questo tipo di valutazioni può essere utile disporre di strumenti che, sintetizzando i risultati di ognuna delle analisi eseguite, consentano, da un lato di confrontare le differenti distribuzioni degli spostamenti o del danno e, dall'altro, di valutare l'influenza che i modelli di calcolo dello spostamento possono avere sulle distribuzioni ottenute. In tal modo è possibile effettuare rapide analisi di carattere previsionale con riferimento a più eventi sismici valutando quali porzioni del territorio esaminato sono soggette a potenziali fenomeni di instabilità e quali siano le estensioni del territorio in cui si supera una data soglia di danno indotto.

Per tale scopo i risultati ottenuti nelle differenti analisi eseguite sono stati analizzati utilizzando il procedimento sinteticamente descritto nel seguito. Per ognuna delle analisi eseguite è stata valutata l'estensione A di tutte le zone potenzialmente instabili presenti nell'area oggetto dello studio e, il corrispondente range dei valori di spostamento permanente calcolati è stato suddiviso in classi di valori. L'estensione delle aree potenzialmente instabili è stata valutata individuando, con una *query* nella funzione *raster calculator* dello *Spatial Analyst*, il numero di celle per le quali il rapporto $k_c/k_{c_{max}}$ risulta inferiore all'unità. Utilizzando, invece, la funzione

zonal statistics, per ciascuna classe dei valori di spostamento permanente è stato valutato il corrispondente numero di celle. Il criterio con il quale si effettua la suddivisione in classi di spostamento è del tutto arbitrario e non influenza in modo significativo il risultato delle analisi qualora, per ciascuna classe, il corrispondente numero di celle è tale da rendere attendibile un approccio di natura statistica. Per tale motivo, il criterio di suddivisione seguito nel presente lavoro ha previsto la definizione di un insieme di classi di valori per le quali il corrispondente numero di celle fosse almeno superiore a 50.

Poiché le celle del modello sono tutte della stessa dimensione, il procedimento descritto consente di ottenere, per ognuna delle analisi eseguite, un insieme di classi di spostamento d e un insieme delle corrispondenti aree A_d in cui questi si manifestano. Per ogni classe di valori, il rapporto A_d/A rappresenta la percentuale della superficie totale A in cui l'entità dello spostamento è compresa tra i valori che definiscono la classe stessa.

La figura 10a, con riferimento ad uno dei due scenari descritti nel paragrafo precedente ed al solo modello di Romeo (2000) mostra la distribuzione del rapporto A_d/A in funzione delle corrispondenti classi di spostamento d e la curva di regressione che meglio interpola i dati. Nella figura 10b si riportano, invece, le curve di regressione ottenute con lo stesso procedimento e con riferimento a tutti i modelli di calcolo degli spostamenti presi in esame nello studio. I risultati mostrati in figura 10b mettono in evidenza l'utilità dell'approccio proposto per l'analisi di stabilità in quanto descrivono con chiarezza la densità spaziale di fenomeni di frana e dei corrispondenti valori degli spostamenti permanenti. Nello stesso tempo, tali risultati consentono di analizzare in maniera sintetica l'influenza che le caratteristiche di ognuno dei modelli di calcolo ha sulle distribuzioni degli spostamenti ottenute nelle analisi.

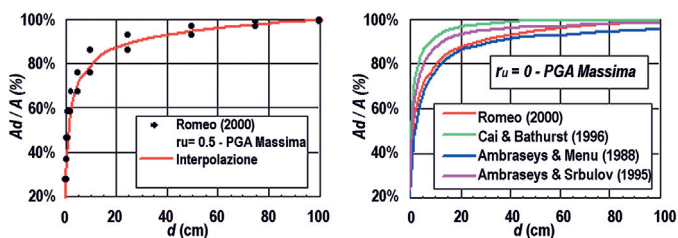
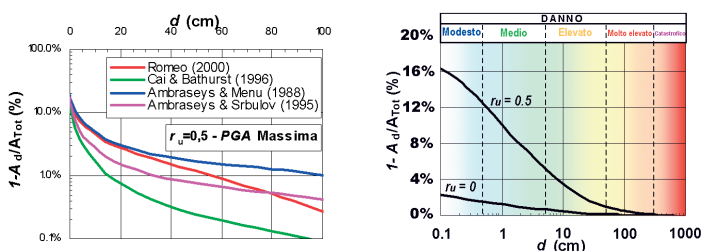


Figura 10
 a) distribuzione del rapporto A_d/A valutata per il caso PGAmass e $r_u=0.5$ con il modello di Romeo (2000);
 b) curve di regressione dei dati ottenute per il caso PGAmass e $r_u=0.5$ con riferimento ai modelli descritti in Tabella 2

Utilizzando le correlazioni mostrate nella Tabella 3, le distribuzioni di frequenza ottenute sono state, infine, analizzate in termini di danno indotto. In particolare, le superfici A_d sono state normalizzate rispetto alla superficie A_{tot} di tutto il territorio preso in esame nella modellazione GIS e il complemento all'unità del rapporto A_d/A è stato riportato in funzione delle corrispondenti classi di spostamento. La figura 11a mostra, per gli stessi casi analizzati nella figura 10b, i risultati così ottenuti. A queste distribuzioni degli spostamenti sono state, infine, sovrapposte le suddivisioni in classi di danno descritte nella Tabella 3. I risultati ottenuti sono riportati nella figura 11b con riferimento al solo modello di Romeo ed alle condizioni $PGA_{max}, r_u=0$ e $PGA_{max}, r_u=0.5$. Le distribuzioni ottenute con riferimento agli altri modelli di calcolo sono omesse per brevità. L'abaco complessivamente ottenuto (figura 11b) rappresenta un ulteriore risultato dell'applicazione della procedura proposta nel presente studio. In particolare, ognuna delle due curve, per un fissato valore dello spostamento permanente, consente di individuare in quale frazione del territorio preso in esame tale valore è superato, ovvero, l'estensione delle aree per le quali l'evento sismico di riferimento, determina il superamento di una data soglia di danno indotto.

Figura 11
 a) Distribuzioni degli spostamenti permanenti ottenute per differenti modelli di calcolo degli spostamenti;
 b) rappresentazione schematica di un abaco ottenuto con l'applicazione della procedura proposta



6. Conclusioni

Nel lavoro è presentata la procedura mediante la quale è stato strutturato ed implementato un SIT "specializzato" per la valutazione delle condizioni di stabilità sismica delle aree in pendio presenti nella provincia di Catania. Le modellazioni effettuate hanno previsto l'utilizzo del metodo degli spostamenti per la valutazione delle condizioni di stabilità sismica delle aree in pendio e l'analisi della risposta in termini di

spostamenti permanenti indotti. Lo scenario sismico di riferimento è stato valutato mediante leggi di attenuazione dei valori di picco del moto al suolo, anch'esse implementate nel SIT proposto. Il SIT sviluppato è caratterizzato da una struttura dati dedicata, di dettaglio, che ha permesso di implementare ed applicare su ampie estensioni territoriali modelli che, negli impieghi tradizionali, hanno trovato applicazioni di estensione limitata. In particolare, tramite il SIT realizzato è possibile determinare scenari relativi alla distribuzione spaziale delle aree potenzialmente instabili e all'entità degli spostamenti permanenti indotti sulle aree in pendio. Utilizzando correlazioni di carattere empirico, è stato inoltre possibile correlare le distribuzioni degli spostamenti permanenti ottenute con i livelli di danno potenzialmente indotto sulle infrastrutture viarie. Le mappe così ottenute sono state dunque sovrapposte a quelle delle principali arterie stradali presenti nella zona consentendo, quindi, di analizzare visivamente l'estensione e l'entità della dislocazione delle zone potenzialmente instabili, e l'eventuale presenza di tronchi delle arterie stradali interessati da eventuali fenomeni di instabilità. I risultati delle analisi condotte sono, stati, infine, sintetizzati in abachi che consentono una rapida valutazione delle frazioni del territorio interessate da un fissato livello di danno indotto.

Bibliografia

- [1] Mussumeci G., Condorelli A., Falchi U.. Data survey and management techniques in civil protection emergencies. XX Congress of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), Istanbul, 2004.
- [2] D'Andrea A., Cafiso S., Condorelli A. Evaluation of seismic risk on road infrastructures. XX World Road Congress, Kuala Lumpur (Malesia), 1999.
- [3] Biondi G., A. Condorelli, G. Mussumeci, M. Maugeri. Modellazione GIS per il monitoraggio su vasta scala della stabilità dei pendii e degli spostamenti permanenti di origine sismica. Atti 7a Conferenza Nazionale ASITA "L'informazione territoriale e la dimensione tempo", 2003.
- [4] Newmark N.M.. Effect of earthquakes on dam and embankment, The Rankine lecture, Geotechnique, Vol.15, No.2, 1965.
- [5] Mankelov J.M.&W. Murphy, 1993. Using GIS in the probabilistic assessment of Earthquake triggered landslide hazards. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 4 (1998), 593-623.
- [6] Jibson R.W. Predicting earthquake-induced landslide displacement using Newmark's sliding block analysis. Transportation Research Record No. 1411, TRB, Washington, D.C., pp.9-17, 1993.
- [7] Maugeri M. Detailed scenarios and action for seismic prevention of damages in the urban area of Catania, GNDT, 2000.
- [8] Biondi G., A. Condorelli, G. Mussumeci, M. Maugeri. Earthquake-triggered landslides hazard in the Catania area. 4th International Conference on Computer Simulation in Risk Analysis and Hazard Mitigation. RISK ANALYSIS 2004, Settembre 2004, Rhodes (Greece), WIT Press.
- [9] Cafiso S., Mussumeci G., Condorelli A.. Functional analysis of the urban road network in seismic emergency. GIS application on Catania city. In "Seismic prevention of damage for Mediterranean cities. A case history: the city of Catania (Italy). M. Maugeri Editor; WIT press.
- [10] Grasso, S., Maugeri, M.. A GIS Model Application Supporting the Analysis of the Seismic Hazard for the Urban Area of Catania (Italy).XIII Europ. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng., Vol. 2, pp.941-946, 2003.
- [11] Sabetta, F., & Pugliese, A. Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong motion records. Bulletin of the seismological Society of America, 77(5), 1491-1513, 1987.
- [12] Ambraseys, N.N., Simpson, K.A., & Bommer, J.J. Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25(4), 371-400, 1996.
- [13] Spudich, P., Joyner, W.B., Lindh, A.G., Boore, D.M., Margaris, B.M., & Fletcher, J.B. SEA99: A revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes. Bulletin of the Seismological Society of America, 89(5), 1156-1170, 1999.
- [14] Tromans I.J. & Bommer J.J. The attenuation of strong-motion peaks in Europe. 12th European Conf. on Earthquake Eng., London, 2000.
- [15] Bommer J.J., Elnashai A.S., Weir A.G. Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes. 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, paper n. 207, 2000.
- [16] Ambraseys N. & Menu J.M.. Earthquake-induced ground displacement. Soil Dynamics and Earthquake Eng., Vol. 16, pp.958-1006, 1988.
- [17] Ambraseys N. & Srbulov M.. Attenuation of earthquake induced displacements. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, pp.467-487. 1995.
- [18] Cai Z. & Bathurst R.J. Deterministic sliding block methods for estimating seismic displacements of earth structures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 16, pp. 255-268, 1996.
- [19] Romeo R. Seismically induced landslide displacement: a predictive model. Engineering Geology, 58, pp. 337-351, 2000.
- [20] Legg M., Slosson J., Eguchi R.. Seismic hazard for lifelines vulnerability analyses. Proc. 3rd Int. conf. on Microzonation, Seattle, Washington (1982).