



# PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività CAM\_F4.4 | Predisposizione della metodologia per l'individuazione delle priorità di intervento (MS3 e edifici strategici) e definizione delle procedure di intervento

Metodologia per la definizione delle priorità di intervento

Regione Campania

**Versione 1.1**

Publicato in data 18/02/2019





# PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività CAM\_F4.4 | Predisposizione della metodologia per l'individuazione delle priorità di intervento (MS3 e edifici strategici) e definizione delle procedure di intervento

## Metodologia per la definizione delle priorità di intervento Regione Campania

**Versione 1.1**

Publicato in data 18/02/2019



## **PON GOVERNANCE E CAPACITA' ISTITUZIONALE 2014-2020**

PROGRAMMA PER IL SUPPORTO AL RAFFORZAMENTO DELLA GOVERNANCE IN MATERIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO E VULCANICO AI FINI DI PROTEZIONE CIVILE

### **Struttura responsabile dell'attuazione del Programma**

Angelo Borrelli (responsabile), Anna Natili (supporto)

#### *Coordinamento*

Fabrizio Brammerini, Angelo Corazza, Biagio Costa, Italo Giulivo, Gaetano Mignone, Paolo Molinari, Francesca Romana Paneforte

#### *Unità operativa rischi*

Paola Bertuccioli, Sergio Castenetto, Stefano Ciolli, Andrea Duro, Emilio De Francesco, Antonio Gioia, Pietro Giordano, Giuseppe Naso, Stefania Renzulli, Daniele Spina

#### *Unità di raccordo DPC*

Sara Babusci, Lavinia Di Meo, Valter Germani, Biagio Prezioso, Chiara Salustri Galli

#### *Amministrazione*

Gabriella Carunchio, Pietro Colicchio, Francesca De Sandro, Stefania Nardella

#### *Referenti Regioni*

Campania: Mauro Biafore (coordinatore), Claudia Campobasso, Luigi Cristiano, Nicola Di Benedetto, Luigi Gentilella, Maurizio Giannattasio, Francesca Maggiò; Puglia: Tiziana Bisantino, Luca Limongelli (coordinatore), Mario Greco, Pierluigi Loiacono, Giuseppe Pastore, Francesco Ronco, Isabella Trulli; Calabria: Domenico Pallaria, Francesco Russo (coordinatore), Giuseppe Iiritano, Carlo Tansi; Sicilia: Nicola Alleruzzo, Aldo Guadagnino, Antonio Torrisi.

### **CNR**

Massimiliano Moscatelli (referente)

#### *Struttura tecnica*

Gianluca Carbone, Federico Mori, Edoardo Peronace, Andrea Rampa, Francesco Stigliano (coordinatore operativo), Eleonora Cianci, Giuseppe Cosentino, Rosa Marina Donolo, Stefania Fabozzi, Gaetano Falcone, Francesco Fazio, Biagio Giaccio, Angelo Gigliotti, Amerigo Mendicelli, Marco Nocentini, Giuseppe Occhipinti, Federica Polpetta, Attilio Porchia, Gino Romagnoli, Valentina Tomassoni, Vitantonio Vacca

#### *Struttura gestionale*

Lucia Paciucci (coordinatore gestionale), Francesco Petracchini, Laura Ragazzi

#### *Referee*

Paolo Boncio, Paolo Clemente, Maria Ioannilli, Massimo Mazzanti, Roberto Santacroce, Carlo Viggiani

### **Commissione tecnica interistituzionale**

Mauro Dolce (presidente)

Laura Albani, Salvo Anzà, Walter Baricchi, Lorenzo Benedetto, Michele Brigante, Gennaro Capasso, Vincenzo Chieppa, Luigi D'Angelo, Lucia Di Lauro, Calogero Foti, Luca Lo Bianco, Giuseppe Marchese, Paolo Marsan, Mario Nicoletti, Mario Occhiuto, Ezio Piantedosi, Roberta Santaniello, Luciano Sulli, Carlo Tansi, Federica Tarducci, Carmela Zarra  
*Segreteria:* Elda Catà, Carletto Ciardiello, Giuseppe Tiberti

### **CAM\_F4.4 – Metodologia per la definizione delle priorità di intervento Regione Campania**

**Responsabile DPC:** Daniele Spina

**Responsabile CNR-IGAG:** Federico Mori

#### **A cura di**

Andrea Gena (CNR-IGAG), Amerigo Mendicelli (CNR-IGAG), Federico Mori (CNR-IGAG).

**Con il supporto tecnico-amministrativo di:** Francesca Argiolas, Patrizia Capparella, Martina De Angelis, Marco Gozzi, Alessandro Leli, Patrizia Mirelli, Simona Rosselli

# Sommario

---

<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
<b>1. Frane sismoindotte</b>	<b>6</b>
1.1 <i>Metodologia</i>	6
1.2 <i>Dati di base</i>	11
1.3 <i>Risultati delle elaborazioni</i>	11
1.4 <i>Validazione</i>	14
<b>2. Liquefazione</b>	<b>17</b>
2.1 <i>Metodologia</i>	17
2.2 <i>Dati di base</i>	21
2.3 <i>Risultati delle elaborazioni</i>	21
2.4 <i>Validazione</i>	24
<b>3. Danneggiamento edilizia residenziale</b>	<b>26</b>
3.1 <i>Metodologia</i>	26
3.2 <i>Dati di base</i>	33
3.3 <i>Risultati delle elaborazioni</i>	34
3.4 <i>Validazione</i>	43
3.4.1 Terremoto di Santo Stefano del 26/12/2018	44
3.4.2 Terremoto Lunigiana del 21/06/2013	44
3.4.3 Terremoto San Giuliano di Puglia del 31/10/2002	44
3.4.4 Terremoto Mormanno del 25/10/2012	44
3.4.5 Terremoto Abruzzo del 07/05/1984	45
3.4.6 Terremoto Umbria Marche del 26/09/1997	45
3.4.7 Terremoto L'Aquila 06/04/2009	45
3.4.8 Terremoto Emilia 20/05/2012	45
<b>Bibliografia</b>	<b>46</b>

## Introduzione

Il presente documento descrive le metodologie semplificate sviluppate al fine di fornire ad una specifica Regione una graduatoria di priorità di intervento multi-criteria dei Contesti Territoriali.

Allo stato attuale le metodologie semplificate, quindi i criteri di ordinamento della graduatoria di priorità di intervento, sono legati ai seguenti aspetti:

- > Valutazione della probabilità di frane sismo-indotte con il modello Nowicki et al. (2018) e relative modifiche proposte dall'USGS;
- > Valutazione della probabilità di liquefazione con il modello Zhu et al. (2017) e relative modifiche proposte dall'USGS;
- > Valutazione della condizione di danneggiamento dell'edilizia residenziale con il modello Lagomarsino e Giovinazzi (2006) come proxy della condizione limite degli insediamenti urbani.

Per ciascuna, in primo luogo, viene descritta la metodologia, poi i dati di base necessari e prodotta la mappa della specifica variabile a livello regionale. Infine viene prodotta una validazione di tali metodologie attraverso il confronto di scenari sismici e cosismici predittivi con dati sperimentali di fenomeni osservati a seguito di alcuni eventi sismici italiani particolarmente significativi.

Un requisito comune per i dati di input delle metodologie semplificate proposte è la facile reperibilità su scala territoriale e la flessibilità di applicazione in qualsiasi ambito territoriale.

Infine è stato sviluppato un primo software in GIS in grado di produrre i risultati sia partendo dalla mappa di pericolosità INGV che da eventi di scenario.

Nel prosieguo delle attività tali metodologie verranno ulteriormente estese e potenziate al fine di produrre una classificazione preliminare dei Contesti Territoriali

# 1. Frane sismoindotte

## *Descrizione degli aspetti metodologici, dei risultati e delle validazioni*

### 1.1 Metodologia

Il fenomeno delle frane sismo-indotte rappresenta un elevato fattore di rischio nelle zone sismicamente attive. Queste, infatti, sono spesso associate a perdite di vite umane, e rappresentano una delle maggiori cause di danni infrastrutturali. Il loro impatto, inoltre, è notevole anche in termini di peggioramento della raggiungibilità e quindi della intera risposta di un sistema di gestione in caso di emergenza.

La possibilità di stimare l'entità del complesso dei movimenti franosi che possono innescarsi a seguito di un evento, pertanto, può avere notevole interesse sia nella fase di gestione dell'emergenza che in ambito di programmazione e allocazione delle risorse.

Il primo modello disponibile in letteratura e applicabile su ampia scala territoriale è quello di Nowicki et al., sviluppato nel 2014 e affinato in un successivo lavoro pubblicato nel 2018. Questo metodo, di tipo statistico, è stato sviluppato a partire da un database di frane ampio mediante l'utilizzo della regressione logistica. Lo scopo è quello di stimare la probabilità di frana in un determinato sito a partire da un valore di un parametro di scuotimento sismico e da dati di suscettibilità globalmente reperibili che descrivono le condizioni locali del sito.

Il metodo, capace di previsioni su scala territoriale in un breve lasso di tempo, è stato migliorato nel corso del tempo tramite l'espansione del data-set di input: una delle condizioni fondamentali per ottenere un buon modello empirico è, infatti, quella di allenarlo tramite dei dati di qualità che rappresentino il più fedelmente possibile la variabilità delle condizioni nelle quali il modello dovrà operare.

La procedura viene costruita tramite i seguenti passi:

#### 1 - Creazione del database e individuazione delle variabili indipendenti

I fattori che controllano il fenomeno delle frane sismo-indotte sono riportati in numerosi studi empirici e riguardano, in via generale: litologia del bedrock, pendenza topografica, intensità dell'input sismico, amplificazione topografica, sistema di fratturazione del bedrock, condizioni idrogeologiche e distribuzione delle frane preesistenti.

I parametri scelti per rappresentare gli aspetti che governano il fenomeno, visto lo scopo del modello, devono essere facilmente reperibili a livello globale. Pertanto vengono scelti i seguenti fattori:

- > Scuotimento sismico;
- > Pendenza topografica;
- > Altitudine;
- > Litologia;
- > Contenuto idrico del suolo;
- > Precipitazioni;
- > Copertura del suolo;
- > Magnitudo.

Per ciascuno di questi vengono prese in considerazione e testate diverse possibili variabili indipendenti che li rappresentano, così come le loro combinazioni e interazioni, valutando tutte le diverse possibili forme del modello prima di scegliere quello con la migliore performance.

Le variabili candidate a far parte del modello sono riassunte nella seguente immagine:

<i>Independent Variables Evaluated for Use in the Logistic Regression Model</i>			
Factor	Variable representation	Data source	Resolution
Shaking	Peak Ground Acceleration (PGA)	USGS <i>ShakeMap</i> System (Worden & Wald, 2016)	1 km <sup>2</sup>
	<b>Peak Ground Velocity (PGV)</b>	USGS <i>ShakeMap</i> System (Worden & Wald, 2016)	1 km <sup>2</sup>
	Modified Mercalli Intensity (MMI)	USGS <i>ShakeMap</i> System (Worden & Wald, 2016)	1 km <sup>2</sup>
Slope	<b>Slope calculated from GMTED median elevation data</b>	Danielson and Gesch (2011)	7.5c (~250 m <sup>2</sup> )
	Maximum Slope	Verdin et al. (2007)	30c (~1 km <sup>2</sup> )
Lithology	<b>GLIM Global Lithology Data</b>	Hartmann and Moosdorf (2012)	Vector Data
	Friction Angle	Godt et al. (2008)	30c (~1 km <sup>2</sup> )
Elevation	Inferred Strength	Hartmann and Moosdorf (2012) and Nadim et al. (2006)	Vector Data
	Mean Elevation	Danielson and Gesch (2011)	7.5c (~250 m <sup>2</sup> )
	Median Elevation	Danielson and Gesch (2011)	7.5c (~250 m <sup>2</sup> )
Soil Wetness	<b>Compound Topographic Index</b>	Moore et al. (1991)	30c (~1 km <sup>2</sup> )
Temporal Wetness	WorldClim mean monthly precipitation	Hijmans et al. (2005)	30c (~1 km <sup>2</sup> )
	CGIAR-CSI Global Aridity	Trabucco and Zomer (2009)	30c (~1 km <sup>2</sup> )
	CGIAR-CSI Global-Monthly Potential	Trabucco and Zomer (2009)	30c (~1 km <sup>2</sup> )
	Evapotranspiration (PET)		
Vegetation Cover (Land Cover)	<b>Globcover 2009 Land Cover</b>	Arino et al. (2012)	300 m
	MODIS Land Cover	Broxton, Zeng, Sulla-Menashe, and Troch (2014)	15c (~500 m <sup>2</sup> )
	Global Land Cover Share 2014	Latham et al. (2014)	30c (~1 km <sup>2</sup> )
	Percent Green Vegetation Cover	Broxton, Zeng, Scheftic, and Troch (2014)	30c (~1 km <sup>2</sup> )
Earthquake Magnitude/Duration	Moment Magnitude	USGS	—

Figura 1 Variabili candidate ad entrare a far parte del modello predittivo (Nowicki et al. 2018)

Per ciascuno di questi parametri viene preliminarmente testata la correlazione con i dati sperimentali per mezzo di istogrammi in cui questi vengono rapportati alle osservazioni empiriche stabilendone il grado di correlazione.

Tali osservazioni qualitative vengono supportate quantitativamente costruendo i coefficienti di Pearson e Cramer, entrambe misure di correlazione tra due variabili. Nella valutazione dei modelli vengono considerate anche i possibili termini di interazione tra le diverse variabili.

A valle di questa analisi vengono individuati i seguenti proxies dei suddetti fattori:

- > PGV (Peak Ground Velocity);
- > Pendenza topografica (slope);
- > Litologia (lithology);
- > Uso del suolo (landcover);
- > CTI (Compound topographic index);
- > Termine di interazione tra PGV e pendenza (il quale può essere interpretato come un termine rappresentativo dell'amplificazione topografica).

Poiché lo scopo è quello di fornire un modello predittivo di applicabilità globale, e che l'affidabilità del modello empirico è strettamente legata alla qualità del data-set in input, viene considerato un insieme di 36 osservazioni di frane sismo-indotte. Queste si differenziano per il metodo di mappatura dei movimenti franosi rilevati: areale o puntuale.

Per ridurre al massimo i dati di scarsa qualità, a ciascuna delle osservazioni viene assegnato un punteggio sulla base di alcune caratteristiche proprie della campagna di indagine. Dai dati di input del modello sono escluse quelle osservazioni che non superano una soglia minima. A seguito di questa operazione il database iniziale si riduce a 23 eventi.

In questo modo, vista la natura predittiva del modello da costruire, viene creato un set di dati con notevole varietà in termini di magnitudo, di caratteristiche del sisma e dell'assetto geologico del sito suscettibile di frana.

## 2 - Campionamento

Per includere nel modello sia i dati areali che puntuali, vista la scarsità di osservazioni complete, viene approntato uno schema di selezione con un algoritmo di buffer circolare che definisce le zone di campionamento a partire dai dati reali, così da creare un set equamente distribuito tra fenomeni osservati e non. Tramite un'analisi di sensibilità è stato confermato che le ipotesi sui raggi del buffer non influenzano il comportamento del modello. In ciascuno dei terremoti si hanno, pertanto, il 50% di osservazioni di frane ed il 50% di non-frane. In questo modo è possibile allenare correttamente il modello conferendogli l'abilità di predire entrambe le possibili situazioni.

Summary of Landslide Inventories Currently Available							
Event (location)	Date	Year	M <sub>w</sub>	Landslide data type	Number of landslide observations	Data quality score	Reference
San Fernando, California	9 February	1971	6.6	Points	391	0.8	Morton (1971)
<b>Guatemala</b>	<b>4 February</b>	<b>1976</b>	<b>7.5</b>	<b>Polygons</b>	<b>6224</b>	<b>3.5</b>	<b>Harp et al. (1981)</b>
<b>Friuli, Italy</b>	<b>5 May</b>	<b>1976</b>	<b>6.5</b>	<b>Points</b>	<b>1007</b>	<b>2.3</b>	<b>Govi (1977)</b>
<b>Coalinga, California</b>	<b>2 May</b>	<b>1983</b>	<b>6.7</b>	<b>Polygons</b>	<b>3980</b>	<b>3.5</b>	<b>Harp and Keefer (1990)</b>
San Salvador, El Salvador	10 October	1986	5.7	Points	268	1.3	Rymer (1987)
Loma Prieta, California	17 October	1989	6.9	Points	528	1.5	Keefer and Manson (1998)
<b>Northridge, California</b>	<b>17 January</b>	<b>1994</b>	<b>6.7</b>	<b>Polygons</b>	<b>11111</b>	<b>3.1</b>	<b>Harp and Jibson (1996)</b>
<b>Kobe, Japan</b>	<b>16 January</b>	<b>1995</b>	<b>6.9</b>	<b>Polygons</b>	<b>2353</b>	<b>3.6</b>	<b>Uchida et al. (2004)</b>
<b>Chi-Chi, Taiwan</b>	<b>20 September</b>	<b>1999</b>	<b>7.7</b>	<b>Polygons</b>	<b>9272</b>	<b>2.4</b>	<b>Liao and Lee (2000)</b>
El Salvador	13 January	2001	7.7	Points	139	1.5	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2017)
El Salvador	13 February	2001	6.6	Points	62	1.5	Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, El Salvador (2017)
Avaj, Iran	22 June	2002	6.5	Points	50	1.2	MahdaviFar et al. (2006)
<b>Denali, Alaska</b>	<b>3 November</b>	<b>2002</b>	<b>7.9</b>	<b>Polygons</b>	<b>1579</b>	<b>2.6</b>	<b>Gorum et al. (2014)</b>
<b>Lefkada, Greece</b>	<b>14 August</b>	<b>2003</b>	<b>6.3</b>	<b>Polygons</b>	<b>274</b>	<b>2.3</b>	<b>Papathanassiou et al. (2013)</b>
<b>Niigata-Chuetsu, Japan</b>	<b>23 October</b>	<b>2004</b>	<b>6.6</b>	<b>Polygons</b>	<b>4615</b>	<b>3.5</b>	<b>Sekiguchi and Sato (2006)</b>
<b>Kashmir, Pakistan</b>	<b>8 October</b>	<b>2005</b>	<b>7.6</b>	<b>Points</b>	<b>2424</b>	<b>3.5</b>	<b>Sato et al. (2007)</b>
<b>Kiholo Bay, Hawaii</b>	<b>15 October</b>	<b>2006</b>	<b>6.7</b>	<b>Polygons</b>	<b>383</b>	<b>3</b>	<b>Harp et al. (2014)</b>
<b>Niigata-Chuetsu-oki, Japan</b>	<b>16 July</b>	<b>2007</b>	<b>6.6</b>	<b>Points</b>	<b>312</b>	<b>2.4</b>	<b>Kokusai Kogyo (2007)</b>
<b>Aysen Fjord, Chile</b>	<b>21 April</b>	<b>2007</b>	<b>6.2</b>	<b>Polygons</b>	<b>517</b>	<b>3.3</b>	<b>Gorum et al. (2014)</b>
<b>Wenchuan, China</b>	<b>12 May</b>	<b>2008</b>	<b>7.9</b>	<b>Polygons</b>	<b>197481</b>	<b>3.4</b>	<b>Xu, Xu, Yao, et al. (2014)</b>
<b>Iwate-Miyagi-Nairuku, Japan</b>	<b>14 June</b>	<b>2008</b>	<b>6.9</b>	<b>Polygons</b>	<b>4211</b>	<b>3.6</b>	<b>Yagi et al. (2009)</b>
Abruzzo, Italy	6 April	2009	6.3	Polygons	89	3	Piacentini et al. (2013)
Sumatra, Indonesia	30 September	2009	7.6	Points	87	1	Umar et al. (2014)
<b>Haiti</b>	<b>12 January</b>	<b>2010</b>	<b>7</b>	<b>Polygons</b>	<b>23567</b>	<b>3.8</b>	<b>Harp et al. (2016)</b>
<b>Sierra Cucupah, Mexico</b>	<b>4 April</b>	<b>2010</b>	<b>7.2</b>	<b>Polygons</b>	<b>453</b>	<b>3.6</b>	<b>Barlow et al. (2015)</b>
<b>Yushu, China</b>	<b>14 April</b>	<b>2010</b>	<b>6.9</b>	<b>Polygons</b>	<b>2036</b>	<b>3.8</b>	<b>Xu et al. (2013)</b>
Lorca, Spain	11 May	2011	5.1	Points	166	0.6	Alfaro et al. (2012)
<b>Tohoku, Japan</b>	<b>11 March</b>	<b>2011</b>	<b>9.1</b>	<b>Polygons</b>	<b>3477</b>	<b>3.4</b>	<b>Wartman et al. (2013)</b>
<b>Lushan, China</b>	<b>20 April</b>	<b>2013</b>	<b>6.6</b>	<b>Polygons</b>	<b>15546</b>	<b>3.8</b>	<b>Xu et al. (2015)</b>
Cook Straight, N.Z.	21 July	2013	6.5	Points	35	0.5	Van Disson et al. (2013)
<b>Minxian-Zhangxian, China</b>	<b>21 July</b>	<b>2013</b>	<b>5.9</b>	<b>Polygons</b>	<b>2330</b>	<b>3.8</b>	<b>Xu, Xu, Shyu, et al. (2014)</b>
Lake Grassmere, N.Z.	16 August	2013	6.5	Points	501	0.6	Van Disson et al. (2013)
Eketahuna, N.Z.	20 January	2014	6.1	Points	176	0.5	Rosser et al. (2014)
<b>Ludian, China</b>	<b>3 August</b>	<b>2014</b>	<b>6.2</b>	<b>Polygons</b>	<b>1024</b>	<b>3.4</b>	<b>Ying-Ying et al. (2015)</b>
Wilberforce, N.Z.	6 January	2015	5.6	Points	265	0.5	GNS Science (2015)
<b>Kumamoto, Japan</b>	<b>15 April</b>	<b>2016</b>	<b>7</b>	<b>Polygons</b>	<b>336</b>	<b>3.5</b>	<b>DSPR-KU (2016)</b>

Figura 2 Lista degli eventi sismici considerati e di quelli effettivamente selezionati (in grassetto) per la costruzione del modello (Nowicki et al. 2018)



Figura 3 Distribuzione geografica degli eventi sismici considerati nella costruzione del modello (Nowicki et al. 2018)

Occorre precisare che il modello non introduce differenze sul meccanismo di frana che si manifesta trattando egualmente fenomeni di scivolamento e crolli in roccia.

### 3 – Regressione logistica

Per modellare la probabilità di frana viene impiegata la regressione logistica, un approccio che può essere efficacemente usato per relazionare un insieme di variabili indipendenti ad una variabile dipendente binaria:

$$P(X) = 1/(1 + e^{-t})$$

In cui  $t = k_0 + k_1 \cdot \ln(PGV) + k_2 \cdot \text{slope} + k_3 \cdot \text{lithology} + k_4 \cdot \text{landcover} + k_5 \cdot CTI + k_6 \cdot \ln(PGV) \cdot \text{slope}$  e i valori  $k$  sono i coefficienti stimati tramite la regressione.

### 4 – Valutazione e validazione del modello

Le predizioni dei 133 possibili modelli sono state valutate dal punto di vista statistico con le seguenti misure:

- > A.I.C. – Akaike Information Criteria;
- > Area sottostante il R.O.C. – Receiver Operating Curve;
- > Log likelihood;
- > Tre misure pseudo-R<sup>2</sup>.

Queste indicano la capacità del metodo di riprodurre i dati sperimentali e possono essere usate per un confronto tra i vari modelli con tutte le possibili combinazioni di variabili.

Ad ulteriore conferma della bontà del modello individuato (best fitting model) sono stati eseguiti il test V.I.F. (Variance Inflation Factor), per valutare che le variabili indipendenti del modello non abbiano una mutua dipendenza, e altri test quali il Blind Test, applicando il modello ad eventi non inclusi nel training set, ed il Leave One Event Out Cross Validation Test, dal quale emerge che in alcuni eventi questo è più performante che in altri.

Oltre a valutare la bontà del modello tramite metriche di performance, ne è stata verificata la capacità di riprodurre il pattern geografico dei fenomeni franosi (trasformando le probabilità ottenute in dati binari si/no applicando una soglia del 50% in accordo con il bilanciamento del modello adottato nella selezione degli input) rispetto a dati realmente osservati, trovando un buon accordo.

Nel best fitting model è stato scelto l'utilizzo della PGV, come parametro di scuotimento sismico, in quanto questa permette di evitare fenomeni di saturazione per alte magnitudo che, invece, si avrebbero utilizzando la PGA.

#### 6 – Conversione della probabilità in percentuale di area in frana

Al fine di calibrare i risultati del modello con le osservazioni sperimentali relative alle aree di validazione (situazioni mappate in termini di area e nelle quali il rapporto tra condizioni stabili e instabili non è necessariamente pari ad 1:1) è stata sviluppata un'equazione correttiva che trasforma la probabilità  $P$  di frana sismo-indotta (priva di significato fisico in quanto dipendente dalle modalità di sviluppo del modello) in termini di porzione di ciascuna cella che è attesa avere un comportamento franoso (areal coverage  $L_p$ ):

$$L_p(P) = \exp[a + bP + cP^2 + dP^3]$$

In cui:

I coefficienti valgono:  $a = -7592$ ,  $b = 5.237$ ,  $c = -3.042$  e  $d = 4.035$  e vengono stabiliti dal fitting del grafico seguente, che esprime la relazione tra le probabilità predette dal modello (campionate su una serie di punti equispaziati che, pertanto, non risentono del bilanciamento del dato di input) e la percentuale di fenomeni franosi da osservazioni reali.

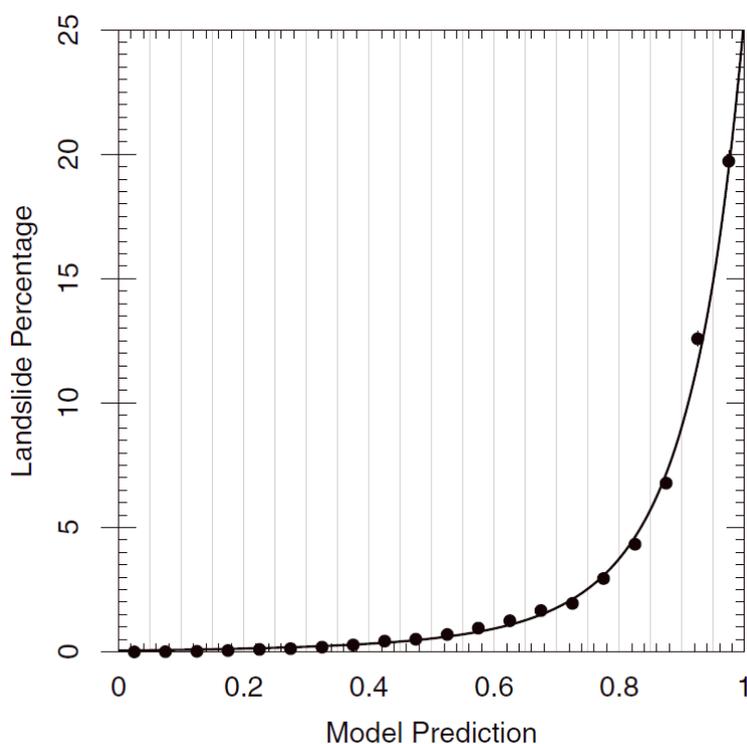


Figura 4 Relazione tra le predizioni del modello in termini di probabilità e percentuale di frana osservata (Nowicki et al. 2018)

#### 7 – USGS: modifiche del modello

L'USGS adotta il modello di Nowicki lievemente modificato, ovvero escludendo le aree con pendenza inferiore a  $5^\circ$ , introducendo una soglia di probabilità pari a 0.002 e modificando alcuni coefficienti sulla litologia.

## 1.2 Dati di base

Per l'applicazione del modello sono necessari i dati riportati nella seguente tabella:

Parametro	Fonte
ln(PGV)	INGV fissato un tempo di ritorno $T_R = 475$ anni. Validazione del modello attraverso mappa di PGV derivata da scenario sismico (Akkar et. al ,2013)
slope	ALOS DEM – Global Digital Terrain Model
lithology	ISPRA – Servizio geologico d'Italia
landcover	ISPRA – Corine Land Cover 2006
CTI	GIS – GRASS V.7.4 (algoritmo r.topidx)

Tabella 1 Lista dei parametri di input del modello e delle fonti presso cui questi sono reperibili

Al fine di eseguire il calcolo della metodologia su tutto il territorio regionale, senza essere quindi vincolati ad uno specifico evento, la mappa di PGV è stata calcolata sulla maglia INGV, per un tempo di ritorno di 475 anni, applicando la relazione proposta da Paolucci et. al (2017):

$$PGV = 0.75 \cdot \left( \frac{S_{0.2}}{g} \cdot \frac{S_1}{g} \right)^{0.55}$$

## 1.3 Risultati delle elaborazioni

Vengono presentati i risultati relativi alle elaborazioni sulle frane sismo-indotte secondo il metodo di Nowicki et al. (2018) in termini di probabilità, di areal coverage e di area in frana relativa al contesto territoriale.

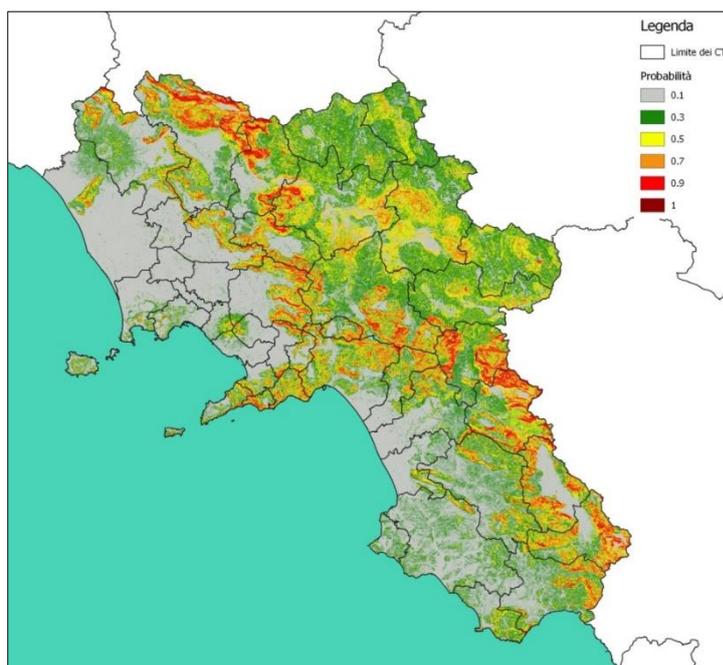


Figura 5 Mappa regionale delle probabilità di frana sismo-indotta

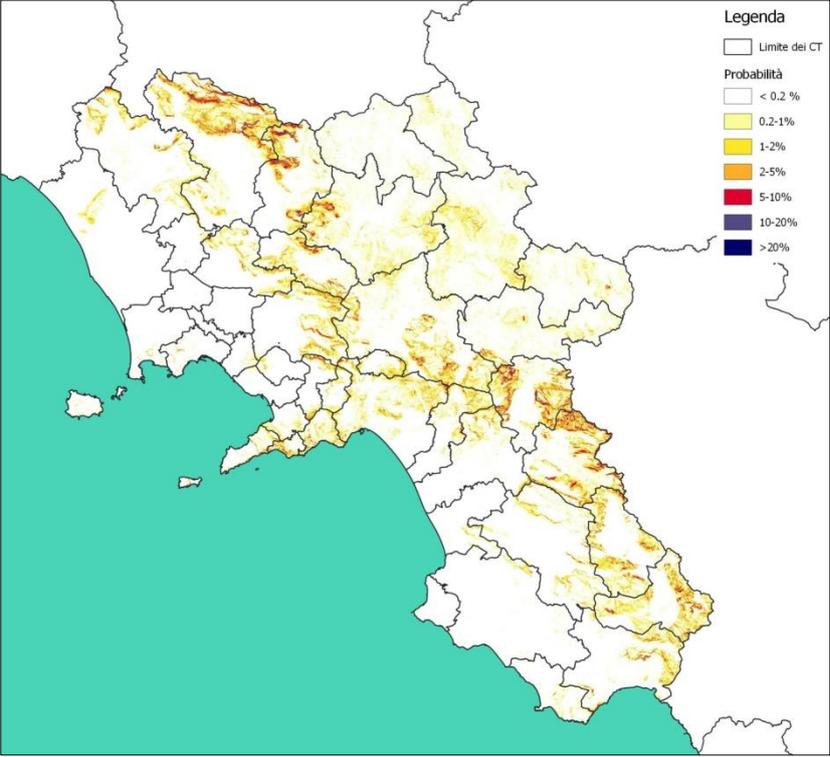


Figura 6 Mappa regionale delle probabilità di percentuale di frana sismo-indotta

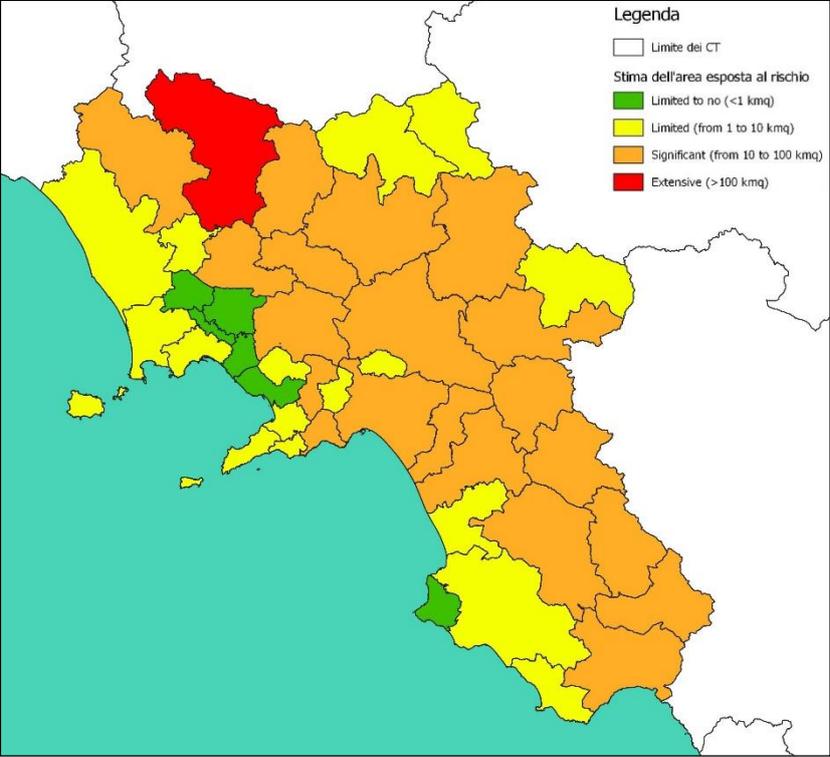


Figura 7 Mappa regionale di area esposta a probabilità di frana sismo-indotta per Contesti Territoriali

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, la priorità in base alla superficie esposta al fenomeno.

N°	Contesto Territoriale	Area in frana [km²]	Superficie totale [km²]
1	PIEDIMONTE MATESE	138.251	791.648
2	BUCCINO	90.715	383.658
3	OLIVETO CITRA	80.92	349.37
4	AVELLINO	73.377	759.494
5	PADULA	60.733	354.722
6	TELESE TERME	59.221	405.28
7	SALA CONSILINA	53.563	361.042
8	BENEVENTO	40.178	699.915
9	NOLA	38.719	374.654
10	SALERNO	37.863	456.296
11	SAPRI	32.886	472.359
12	MONTESARCHIO	30.158	251.877
13	TEANO	29.871	619.926
14	CASERTA	19.982	284.269
15	ARIANO IRPINO	19.437	712.372
16	ROCCADASPIDE	18.389	615.308
17	BATTIPAGLIA	15.926	205.527
18	EBOLI	12.808	387.719
19	SANT'ANGELO DEI LOMBARDI	12.661	497.9
20	SARNO	10.678	93.808
21	AMALFI	10.456	72.707
22	SOLOFRA	7.495	62.158
23	VALLATA	7.073	409.918
24	POSITANO	6.78	32.953
25	SORRENTO	5.604	72.738
26	MONDRAGONE	4.131	722.249
27	NOCERA INFERIORE	3.587	62.895
28	CAMEROTA	2.626	167.937
29	VALLO DELLA LUCANIA	2.589	728.488
30	CASTELLAMMARE DI STABIA	2.44	71.333
31	SAN MARCO DEI CAVOTI	2.233	483.94
32	SAN BARTOLOMEO IN GALDO	2.142	305.347
33	SANTA MARIA CAPUA VETERE	1.857	137.639
34	ISCHIA	1.464	46.485
35	POZZUOLI	1.314	216.259
36	NAPOLI	1.293	118.699
37	CAPRI	1.282	10.509
38	CAPACCIO	1.138	228.349
39	SAN GIUSEPPE VESUVIANO	1.11	78.311

40	SAN GIORGIO A CREMANO	0.398	65.164
41	CASTELLABATE	0.068	90.423
42	TORRE DEL GRECO	0.031	95.378
43	AVERSA	0.017	96.476
44	CAIVANO	0	135.843
45	ARZANO	0	36.496

Tabella 2 Classifica regionale della priorità di intervento in base all'area esposta alla probabilità di frana sismo-indotta

### 1.4 Validazione

La metodologia è stata applicata a 4 eventi sismici in modo da poter costruire un utile confronto tra i risultati delle elaborazioni e l'occorrenza reale del fenomeno cosismico, estrapolata dai cataloghi o da alcuni lavori presenti in letteratura.

La PGV è stata calcolata da scenario sismico attraverso la legge di attenuazione di Akkar et al. (2013).

Di seguito sono riassunte i casi ai quali è stata applicata la metodologia e i risultati ottenuti per l'evento del Friuli del 06-05-1976:

Evento	X WGS UTM Zone 33N	Y WGS UTM Zone 33N	M <sub>w</sub>	Stile di faglia	Profondità [km]
1. Friuli 06-05-1976	368906.779	5124245.367	6.4	Thrust Fault	5.7
2. L'aquila 06-04-2009	366474.729	4688688.606	6.3	Normal	8.3
3. Central Italy 30-10-2016	345446.149	4743561.256	6.5	Normal	9.2
4. Calabria 05-02-1783	584967	423970	7.1	Normal	10

Tabella 3 Eventi sismici per i quali la metodologia è stata applicata

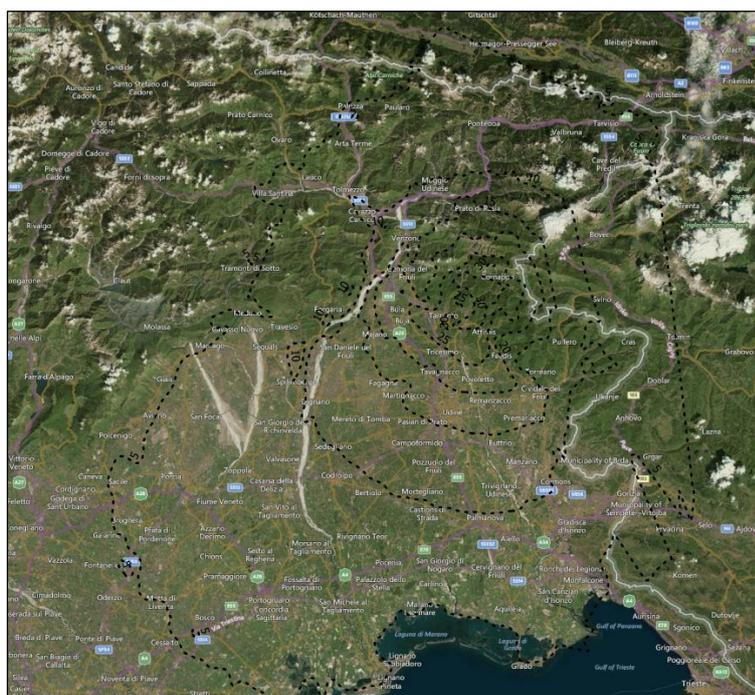


Figura 8 ShakeMap, in termini di PGV, dell'evento del Friuli 06-05-1976 calcolata attraverso la legge di attenuazione di Akkar et al (2013).

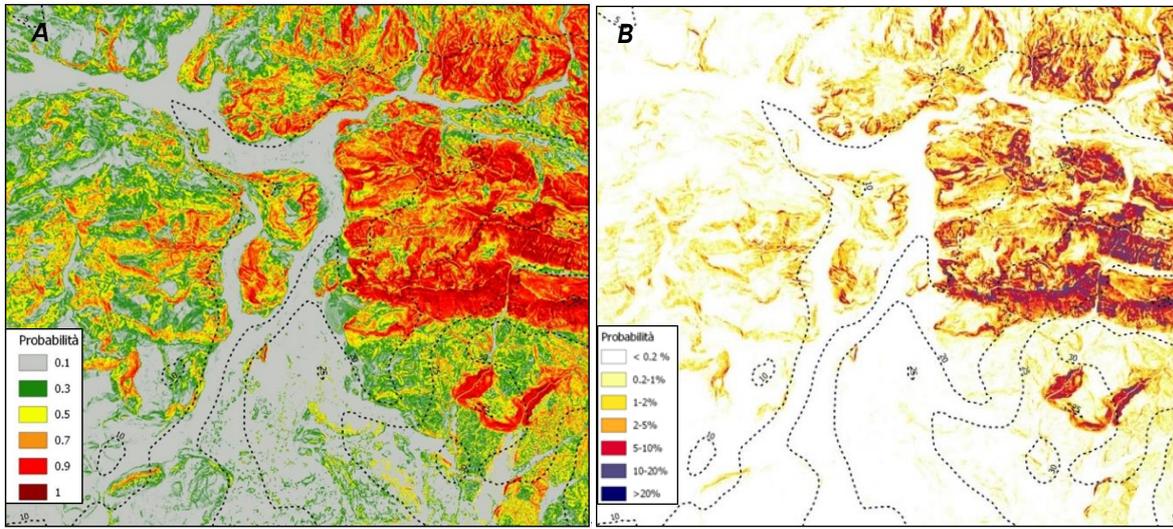


Figura 9 Mappa delle probabilità di frana sismo-indotta (A) e di areal coverage (B) ricavate dall'applicazione del modello

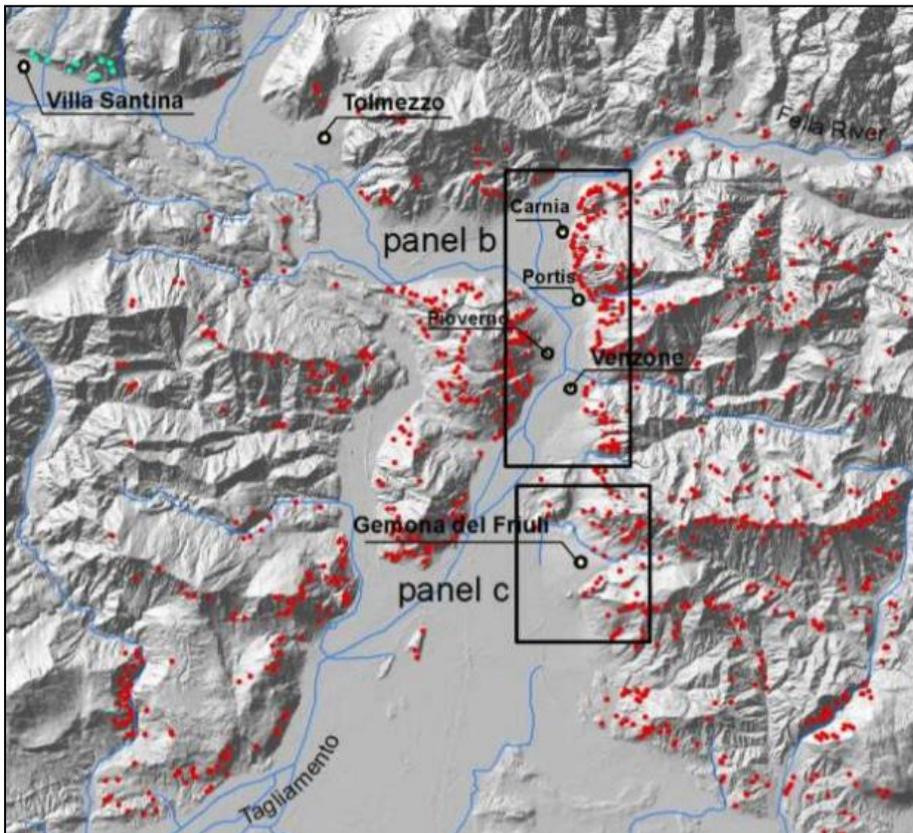


Figura 10 Distribuzione dei fenomeni di instabilità sismo-indotta (punti rossi) relativi all'evento del Friuli 06-05-1976, Valagussa et. al (2014)

Dal confronto della mappa di distribuzione fenomeni di instabilità sismo-indotta Valagussa et. al (2014), con le mappe di probabilità prodotte dal modello, si può notare come i punti rossi, che rappresentano i movimenti franosi rilevati in seguito del sisma, si concentrano proprio nelle aree dove il modello associa una maggiore probabilità di occorrenza del fenomeno.

## 2. Liquefazione

### *Descrizione degli aspetti metodologici, dei risultati e delle validazioni*

#### 2.1 Metodologia

Il fenomeno della liquefazione in conseguenza ad un sisma può indurre danni strutturali ed infrastrutturali significativi a causa dei cedimenti verticali e degli spostamenti laterali permanenti indotti nel suolo. La produzione di mappe di probabilità di liquefazione a scala territoriale, pertanto, rappresenta un importante strumento di programmazione e di allocazione di risorse. La maggior parte dei metodi per mappare il rischio di liquefazione sono basati su carte geologiche dettagliate e su dati geotecnici. In un sistema territorialmente esteso risulta di fondamentale importanza l'utilizzo di un metodo fondato esclusivamente su parametri geospaziali, facilmente reperibili su scala mondiale, nell'ottica di previsione dell'entità del rischio di liquefazione a scala regionale. Le caratteristiche del metodo rispondono alle esigenze di facile reperibilità dei dati di input, necessarie per l'analisi di contesti spazialmente estesi.

La metodologia di riferimento è quella di Zhu et al. (2017) la quale viene costruita in maniera empirica secondo i seguenti passi:

##### 1 - Creazione del database

Poiché lo scopo è quello di fornire un modello predittivo di applicabilità globale, e la affidabilità del modello empirico è strettamente legata alla qualità del data-set, vengono impiegati i record di 27 eventi sismici, relativi a diverse parti del globo, riassunti nella figura successiva.

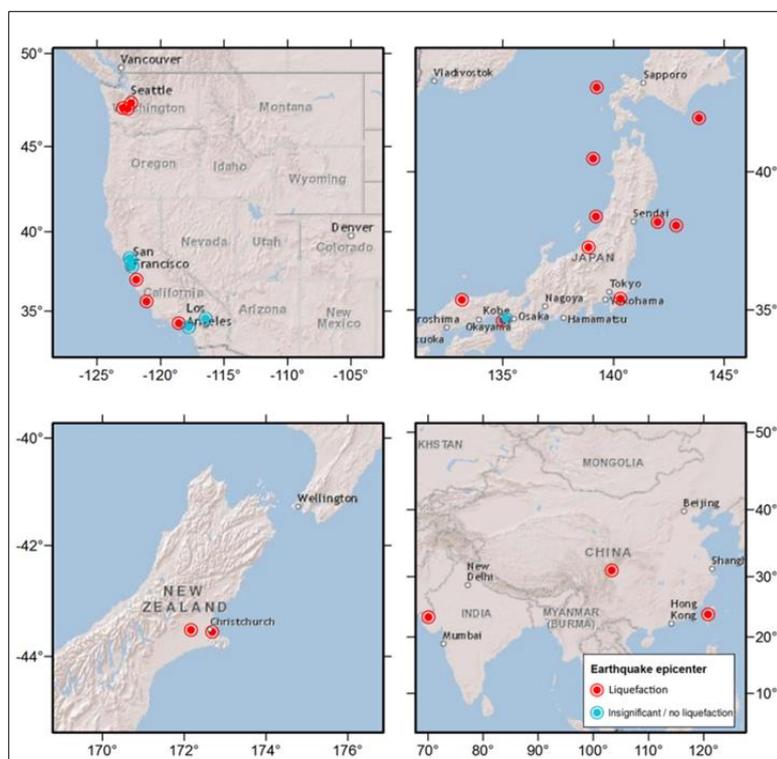


Figura 11 Mappa degli eventi sismici impiegati per il database (Zhu et al. 2017)

Vista la natura predittiva del modello da costruire viene creato un database con notevole varietà in termini di magnitudo degli eventi e assetto geologico dei siti suscettibili di liquefazione. Si considerano, per lo stesso motivo, sia gli eventi che hanno attivato fenomeni di liquefazione che eventi per i quali questi non si sono verificati.

La maggior parte degli eventi sismici considerati si trova in aree costiere le quali, tuttavia, sono le più suscettibili di liquefazioni e sono quelle caratterizzate dalla maggiore attività tettonica.

Il database globale è stato ottenuto dall'unione di più fonti, a seguito di un massiccio lavoro di revisione di letteratura. I diversi singoli data-set possono essere completi, con identificazione di poligoni di liquefazione e corredati da numerosi altri parametri, e incompleti, con informazioni limitate e puntuali.

## 2 - Individuazione dei parametri rilevanti

In parallelo alla creazione del database sono stati esplorati i parametri predittivi migliori per l'implementazione del modello. Gli aspetti che governano il fenomeno della liquefazione presi in considerazione sono: densità del suolo, grado di saturazione, input sismico. Restano esclusi altri parametri importanti, quali l'indice di plasticità, che non soddisfano il requisito di facile reperibilità su scala globale.

Vengono individuati delle variabili proxy candidate ad entrare a far parte del modello, riassunte nella tabella seguente.

Summary of All Candidate Explanatory Variables				
Variable Description	Variable Name	Density	Saturation	Load
Shear-wave velocity over the first 30 m (slope derived)	$V_{S30}$	•		
Elevation	<i>elev</i>	•		
Topographic slope	<i>slope</i>	•		
Roughness	<i>rough</i>	•		
Topographic position index	TPI	•		
Terrain roughness index	TRI	•		
Distance to the nearest coast	<i>dc</i>	•	•	
Compound topographic index	CTI		•	
Global water table depth	<i>wtd</i>		•	
Distance to the nearest river	<i>dr</i>		•	
Distance to the nearest water body	<i>dw</i>		•	
Elevation above the nearest water body	<i>hwater</i>		•	
Mean annual precipitation	<i>precip</i>		•	
Aridity index	AI		•	
Peak ground acceleration	PGA			•
Peak ground velocity	PGV			•
Magnitude	$M_w$			•
Magnitude-scaling factor	MSF			•

Figura 12 Lista delle variabili candidate a far parte del modello (Zhu et al. 2017)

Per ciascuna di queste è possibile costruire delle mappe georeferenziate a partire da dati "poveri" facilmente ricavabili su scala mondiale.

Ai fini della selezione delle variabili di ingresso del modello è stato considerato anche l'effetto di interazione tra le coppie dei parametri stessi.

Alla fine della procedura è possibile identificare i seguenti parametri quali input ottimale per in modello:

- >  $\ln(PGV)$  - Peak Ground Velocity;
- >  $\ln(V_{s,30})$  - Velocità equivalente di propagazione delle onde sismiche S nei primi 30 m di suolo;
- > precip – Precipitazioni;
- > dw - Distanza dalla costa o dai corsi d'acqua;
- > wtd - Profondità della falda.

### 3 - Campionamento

Per ciascuno degli eventi sismici i parametri sono stati campionati su una griglia regolare di passo 100 m. Le soglie di campionamento sono state ottimizzate sulla base dei risultati ottenuti ed è stata predisposta una apposita routine per l'estrazione di dati di 'non liquefazione' che, generalmente, risulta poco documentata, così da garantire un set di dati bilanciato.

Specifiche procedure sono state impiegate per ottenere la massima stabilità del modello e scongiurare fenomeni di overfitting.

### 4 – Regressione logistica

Per modellare la probabilità di frana viene impiegata la regressione logistica, un approccio che può essere efficacemente usato per relazionare un insieme di variabili indipendenti ad una variabile dipendente binaria:

$$P(X) = 1/(1 + e^{-t})$$

In cui  $t = k_0 + k_1 \cdot \ln(PGV) + k_2 \cdot \ln(V_{s,30}) + k_3 \cdot precip + k_4 \cdot dtw + k_5 \cdot wtd$  e i valori k sono i coefficienti stimati tramite la regressione.

### 5 – Valutazione e validazione del modello

Le predizioni statistiche sono state positivamente valutate tramite il punteggio Brier, i parametri true positive rate TPR e false positive rate FPR, utili per metodi binari, oltre alla curva ROC e al parametro AUC.

Oltre a valutare la bontà del modello tramite metriche di performance, ne è stata verificata la capacità di riprodurre il pattern geografico dei fenomeni di liquefazione rispetto a dati realmente osservati, trovando un sostanziale accordo.

Inoltre il modello è stato validato, escludendo il parametro rappresentativo dello scuotimento sismico, in termini di mappe di suscettibilità alla liquefazione, tramite il confronto con predizioni su studi geologici.

### 6 – Conversione della probabilità in percentuale di area in liquefazione

Anche nel modello di Zhu et al. (2017) occorre mettere in relazione le probabilità effettivamente stimate dal modello con la percentuale di aree in liquefazione effettivamente registrate in eventi mappati completamente e in relazione alla versione precedente del modello Zhu et al. (2015) (nella quale il database non era bilanciato e ben si accordava ai risultati sperimentali). La relazione tra la probabilità e l'area effettivamente in liquefazione è espressa dalla figura seguente.

La relazione tra P ed L è data dalla seguente formula:

$$L(P) = \frac{a}{(1 + be^{-cp})^2}$$

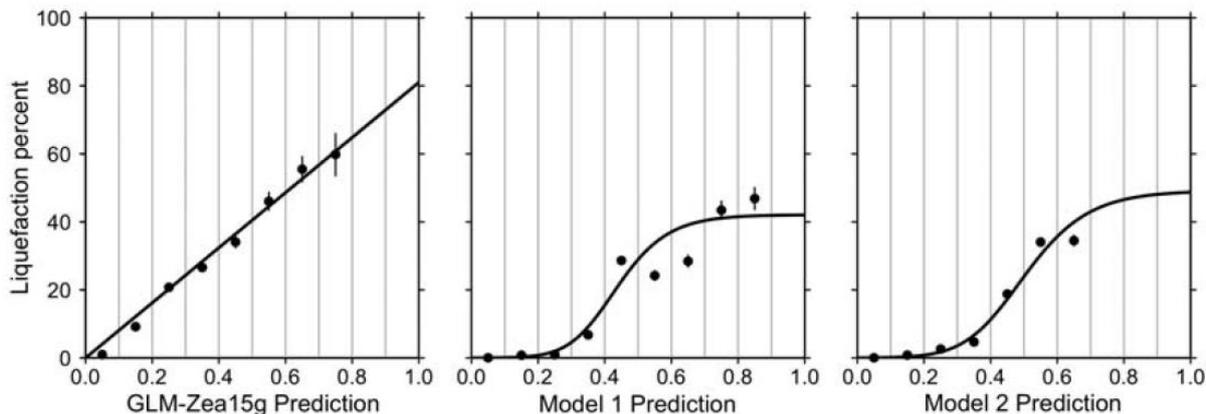


Figura 13 Relazione tra la probabilità di frana e la sua estensione percentuale

Parameters	Model 1	Model 2
<i>a</i>	42.08	49.15
<i>b</i>	62.59	42.40
<i>c</i>	11.43	9.165

Figura 14 Parametri della legge L(P)

Nel lavoro di Zhu et. al vengono proposti due modelli predittivi. Il primo modello (model costal) si può applicare, esclusivamente, ad aree di studio poco distanti dalle coste (fino ad un massimo di 20 km dalla linea di costa). Il secondo modello (model general) si applica anche nelle aree più interne rispetto alla linea di costa. Nel presente lavoro vengono riportati i risultati riferiti al solo model general.

#### 7 – Correzione della PGV in base alla magnitudo

Vista la tendenza del modello alla sovrastima delle probabilità di liquefazione a seguito di eventi di magnitudo moderata, viene introdotto il fattore moltiplicativo della PGV SF, così definito in base alla magnitudo:

$$SF = \frac{1}{1 + e^{-(m-6)}}$$

## 2.2 Dati di base

Per l'applicazione del modello sono necessari i dati riportati nella seguente tabella:

Parametro	Fonte
ln(PGV)	INGV per un tempo di ritorno di 475 anni. Validazione del modello attraverso mappa di PGV derivata da scenario sismico (Akkar et. al ,2013)
ln(Vs,30)	Raster USGS slope-based
precip	WorldClim - CGIAR-CSI
dw	Metodi GIS – Reticolo idrografico, acque interne e linea di riva (ISPRA)
wtd	Global dataset - Fan et al. (2013)

Tabella 4 Lista dei parametri di input del modello e delle fonti presso cui questi sono reperibili

Al fine di eseguire il calcolo della metodologia su tutto il territorio regionale, senza essere quindi vincolati ad uno specifico evento, la mappa di PGV è stata calcolata sulla maglia INGV, per un tempo di ritorno di 475 anni, applicando la relazione proposta da Paolucci et. al (2017):

$$PGV = 0.75 \cdot \left( \frac{S_{0.2}}{g} \cdot \frac{S_1}{g} \right)^{0.55}$$

## 2.3 Risultati delle elaborazioni

Vengono presentati i risultati relativi alle elaborazioni sulle liquefazioni secondo il metodo di Zhu et al. (2017) sia in termini probabilistici sia di percentuale di area in liquefazione.

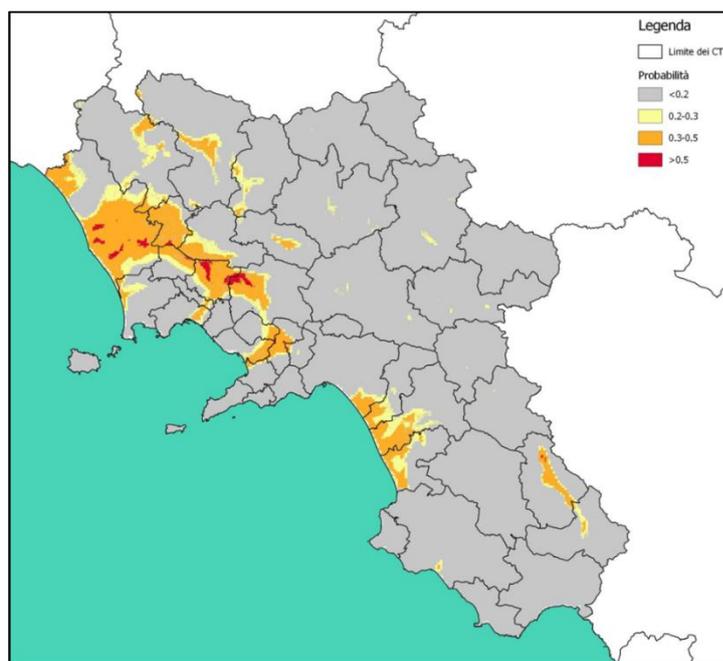


Figura 15 Mappa regionale delle probabilità di liquefazione

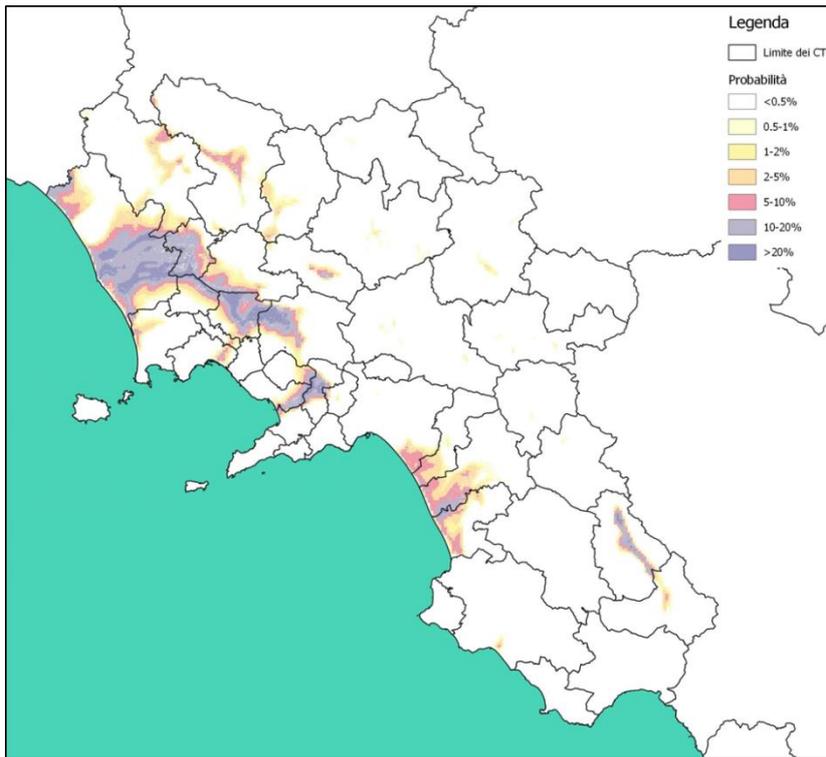


Figura 16 Mappa regionale delle probabilità di percentuale di liquefazione

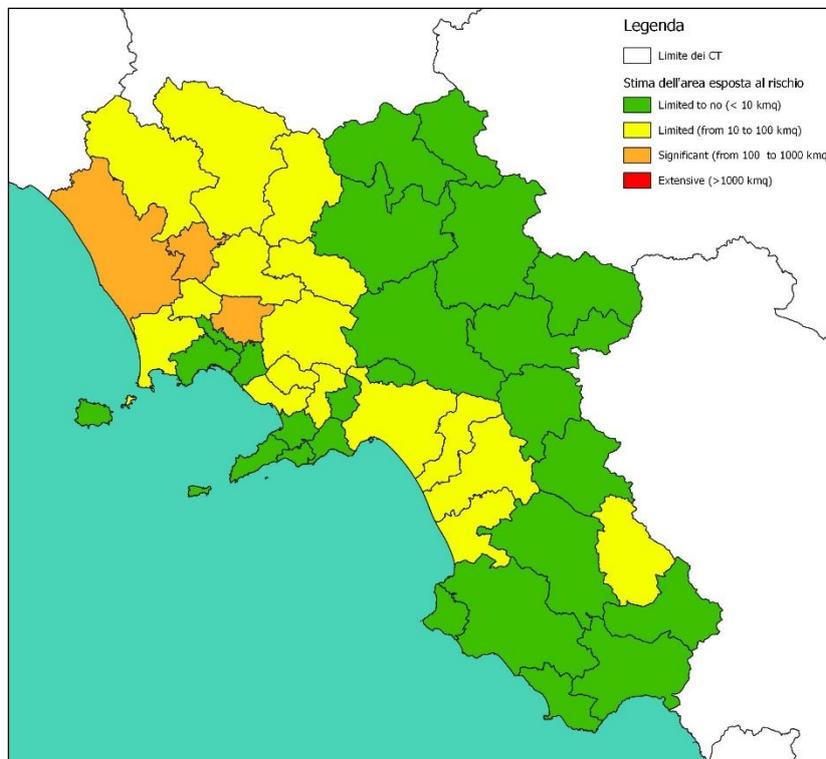


Figura 17 Mappa regionale di area esposta a probabilità di liquefazione per Contesto Territoriale

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, l'area esposta al fenomeno.

N°	Contesto Territoriale	Area in liquefazione [km²]	Superficie totale [km²]
1	MONDRAGONE	430.664	722.249
2	SANTA MARIA CAPUA VETERE	103.023	137.639
3	CAIVANO	100.513	135.843
4	EBOLI	96.076	387.719
5	NOLA	82.181	374.654
6	TEANO	63.175	619.926
7	CASERTA	59.976	284.269
8	CAPACCIO	57.564	228.349
9	PIEDIMONTE MATESE	52.216	791.648
10	SALA CONSILINA	48.116	361.042
11	AVERSA	39.026	96.476
12	BATTIPAGLIA	37.712	205.527
13	SALERNO	31.698	456.296
14	SARNO	30.557	93.808
15	TORRE DEL GRECO	28.381	95.378
16	TELESE TERME	19.374	405.28
17	POZZUOLI	19.233	216.259
18	SAN GIUSEPPE VESUVIANO	14.51	78.311
19	MONTESARCHIO	14.296	251.877
20	NAPOLI	9.904	118.699
21	PADULA	9.287	354.722
22	CASTELLAMMARE DI STABIA	6.1	71.333
23	NOCERA INFERIORE	4.256	62.895
24	ARZANO	3.983	36.496
25	VALLO DELLA LUCANIA	2.203	728.488
26	ARIANO IRPINO	0.824	712.372
27	BENEVENTO	0.33	699.915
28	SAN GIORGIO A CREMANO	0.13	65.164
29	AVELLINO	0.086	759.494
30	CASTELLABATE	0	90.423
31	SAN MARCO DEI CAVOTI	0	483.94
32	SAN BARTOLOMEO IN GALDO	0	305.347
33	CAMEROTA	0	167.937
34	VALLATA	0	409.918
35	SANT'ANGELO DEI LOMBARDI	0	497.9
36	ROCCADASPIDE	0	615.308
37	ISCHIA	0	46.485
38	SAPRI	0	472.359
39	SORRENTO	0	72.738
40	SOLOFRA	0	62.158

41	CAPRI	0	10.509
42	AMALFI	0	72.707
43	POSITANO	0	32.953
44	OLIVETO CITRA	0	349.37
45	BUCCINO	0	383.658

Tabella 5 Classifica regionale della priorità di intervento in base alla superficie esposta alla probabilità di liquefazione

## 2.4 Validazione

La metodologia è stata applicata per diversi eventi sismici in modo da poter costruire un utile confronto tra i risultati delle elaborazioni e l'occorrenza reale del fenomeno cosismico, estrapolata dai cataloghi o da alcuni lavori presenti in letteratura. La PGV è stata calcolata da scenario sismico attraverso la legge di attenuazione di Akkar et. al (2013).

Di seguito sono riassunte i casi ai quali è stata applicata la metodologia e i risultati ottenuti per l'evento della Marsica del 13-01-1915:

Evento	X WGS UTM Zone 33N	Y WGS UTM Zone 33N	M <sub>w</sub>	Stile di faglia	Profondità [km]
1. Friuli 06-05-1976	368906.779	5124245.367	6.4	Thrust Fault	5.7
2. L'Aquila 06-04-2009	366474.729	4688688.606	6.3	Normal	8.3
3. Marsica 13-01-1915	378208.491	4652265.309	7.1	Normal	8
4. Bologna 20-05-2012	204635.475	4978548.741	5.8	Thrust Fault	10
5. Calabria 05-02-1783	584967	423970	7.1	Normal	10

Tabella 6 Eventi sismici per i quali la metodologia è stata applicata

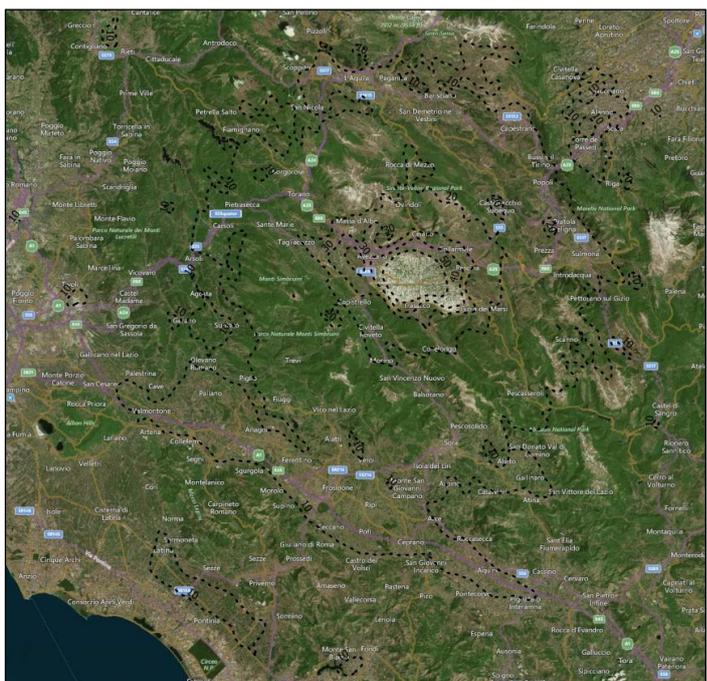


Figura 18 ShakeMap, in termini di PGV, dell'evento della Marsica del 13-01-1915 calcolata attraverso la legge di attenuazione di Akkar et. al (2013)

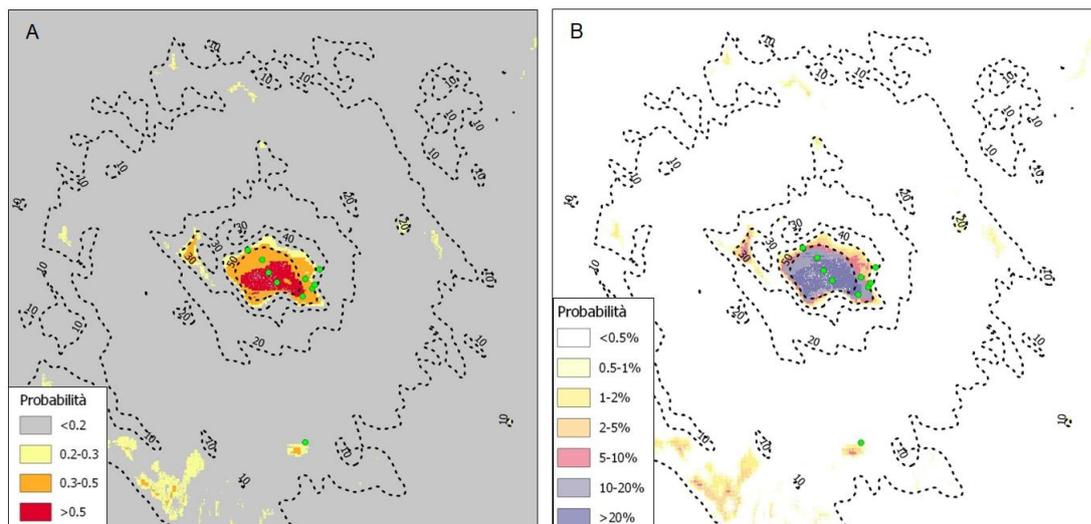


Figura 19 Mappa delle probabilità di liquefazione(A) e di areal coverage (B) ricavate dall'applicazione del modello, i punti in verde indicano i siti dove è stata rilevata la liquefazione a seguito dell'evento (Galli 2000).

Dalla sovrapposizione del catalogo di Galli (2000) (punti in verde) con le mappe di probabilità prodotte dal modello si può notare come questi ricadono quasi del tutto nelle aree dove il modello attribuisce una maggiore probabilità di occorrenza del fenomeno.

## 3. Danneggiamento edilizia residenziale

### *Descrizione degli aspetti metodologici, dei risultati e delle validazioni*

#### 3.1 Metodologia

La procedura delineata conduce alla determinazione di scenari di danno a scala territoriale sulla base di mappe statiche di pericolosità sismica e dati censuari “poveri” sull’edilizia residenziale. Il fine ultimo della metodologia è quello di produrre mappe regionali sulle quali, per ciascuno dei Contesti Territoriali, vengono riportati dei parametri indicatori “proxy” del raggiungimento o meno di una Condizione Limite in quell’ambito territoriale.

Le basi teoriche si radicano nell’approccio macrosismico di Lagomarsino e Giovinazzi, 2006 sviluppato nell’ambito del progetto Risk-UE e cross-validato, all’interno della stessa memoria, con metodi meccanici. Precedenti calibrazioni e validazioni del metodo erano state effettuate dagli autori nell’anno 2011 sulla base di dati, desunti da terremoti reali, in termini di intensità macrosismica EMS-98, che rappresenta una misura della severità dell’evento sulla base del danno osservato.

Il metodo macrosismico consente la valutazione in forma chiusa del danno atteso in funzione della vulnerabilità degli edifici oggetto di valutazione e dell’input sismico.

La vulnerabilità è espressa sulla base di dati tipologici e costruttivi tramite due parametri detti, rispettivamente, indice di duttilità  $Q$  e indice di vulnerabilità  $V$ .

La forzante sismica è descritta in termini di intensità macrosismica in accordo con la scala europea EMS-98, considerato come una variabile continua su suolo rigido.

Il danno strutturale e non strutturale sugli edifici è suddiviso in cinque gradi  $D_k$  ( $k = 0/5$ ):  $D_1$  lieve,  $D_2$  moderato,  $D_3$  grave,  $D_4$  molto grave,  $D_5$  distruttivo con l’aggiunta del livello  $D_0$  relativo all’assenza di danno.

La correlazione che intercorre tra il danno atteso medio  $\mu_D$  ( $0 < \mu_D < 5$ ) e gli altri parametri introdotti è data da:

$$\mu_D = 2.5 \cdot \{1 + \tanh[(I + 6.25 \cdot V - 13.1)/Q]\}$$

La probabilità  $p_k$  di avere un grado di danno  $D_k$  segue una distribuzione binomiale la cui densità di probabilità può essere espressa tramite:

$$p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \left(\frac{\mu_D}{5}\right)^k \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)^{5-k}$$

Anche la deviazione standard può essere espressa in funzione del valor medio del danno:

$$\sigma_D = \sqrt{\mu_D \cdot \left(1 - \frac{\mu_D}{5}\right)}$$

La distribuzione binomiale è stata impiegata essendosi dimostrata adatta a descrivere statisticamente le distribuzioni di danno realmente osservate a seguito del terremoto dell’Irpinia nel 1980.

E’ possibile associare, ad una data tipologia edilizia, un valore convenzionale dell’indice di vulnerabilità  $V$ . Infatti, seguendo la filosofia della tabella di vulnerabilità EMS-98 (Grunthal, 1998), il comportamento sismico delle tipologie costruttive è

collegato al comportamento sismico di classi di vulnerabilità. Più in dettaglio, per ciascuna tipologia, viene fornito il valore di classe di vulnerabilità più probabile e un range di variazione.

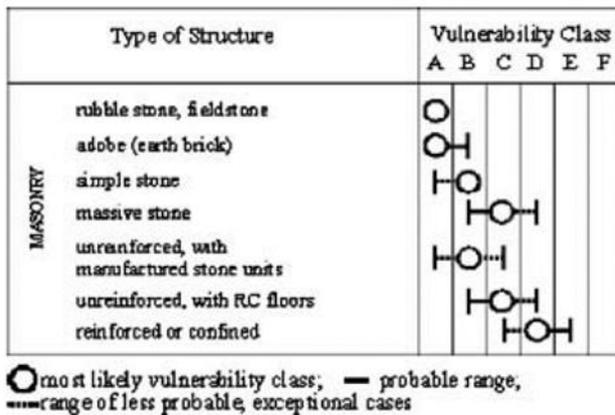


Figura 20 Classi di vulnerabilità secondo EMS98

La corrispondenza tra classe di vulnerabilità ed indice di vulnerabilità convenzionale è riportato nella figura successiva, dove si trovano anche i range di variazione, descritti da una funzione  $\chi(V)$ .

Il fattore di duttilità  $Q$ , in questa fase, può essere fissato pari ad un valore 2.3.

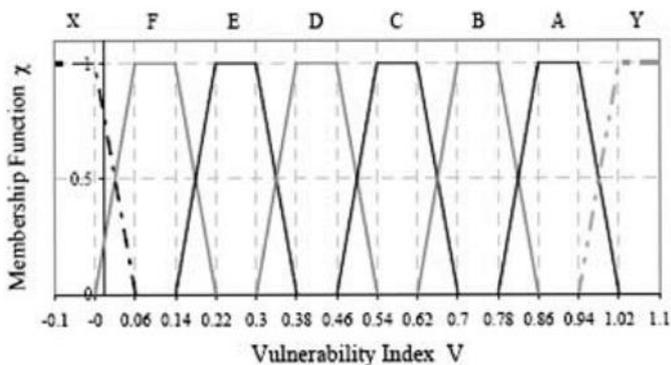


Figura 21 Funzione  $\chi(V)$

Numericamente è possibile identificare i seguenti valori per l'indice di vulnerabilità  $V$  delle classi da A a D:

	Indice di vulnerabilità $V$			
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Minimo	0.82	0.66	0.50	0.34
Medio	0.90	0.74	0.58	0.42
Massimo	0.98	0.82	0.66	0.50

Tabella 7 Indice di vulnerabilità in base alla classe

Il legame tra i dati tipologici e la distribuzione del costruito in classi di vulnerabilità può essere ritrovato nella procedura BINC (Building Inventory at National scaled based on Census data) il cui scopo è quello di individuare, fissato l'ambito di territoriale di riferimento, la distribuzione in termini di classi di vulnerabilità, in accordo con la scala macrosismica europea EMS-98, sulla base di soli dati censuari. L'approccio è descritto in Cacace et al. (2016) e si fonda su due database: ISTAT 2001, a scala nazionale e con informazioni di carattere aggregato, e PLINIVS, a scala regionale (circa 180000 edifici appartenenti a 800 Comuni italiani), in cui le informazioni sono di carattere disaggregato.

I parametri tipologici considerati sono sei: posizione dell'edificio nell'aggregato, materiale costituente le strutture verticali, età di costruzione, numero di piani fuori terra, altimetria del Comune e classe demografica.

Per ciascun edificio la classe di vulnerabilità sismica è individuata sulla base delle sue caratteristiche secondo il metodo statistico 'SAVE' (Strumenti Aggiornati per la Vulnerabilità sismica del patrimonio Edilizio e dei sistemi urbani) partendo dalla scala macrosismica europea e definendo, in base agli aspetti tipologici rilevanti (età dell'edificio, regolarità geometrica, strutture orizzontali, presenza di incatenamenti, posizione nell'aggregato tipologia di copertura), dei modificatori di vulnerabilità aventi un determinato peso, calibrato sull'osservazione di reali danneggiamenti indotti nei più severi terremoti italiani successivi a quello avvenuto in Irpinia nel 1980.

La procedura 'SAVE', applicata a ciascun edificio, lo iscrive in una classe di vulnerabilità sulla base di un parametro numerico detto Synthetic Parameter of Damage (SPD) il quale considera l'influenza di ciascun aspetto tipologico rilevante.

In termini di età di costruzione è possibile ricavare le seguenti frequenze di ricorrenza delle classi di vulnerabilità (A, B, C, e D):

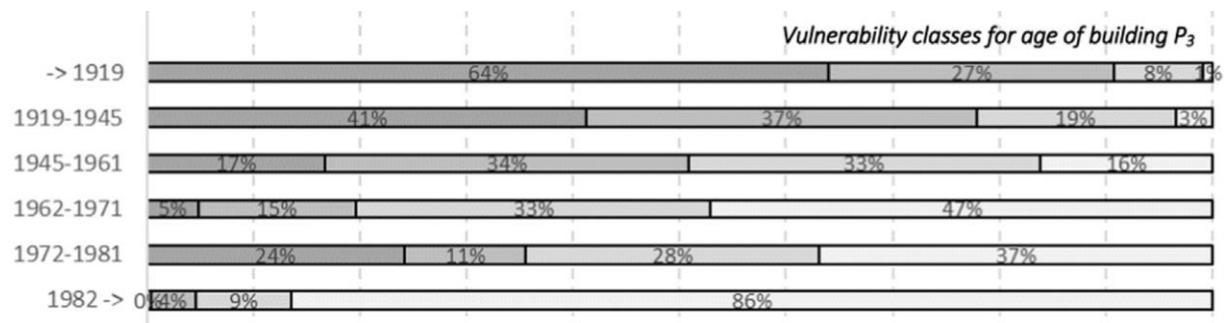


Figura 22 Classi di vulnerabilità del costruito per anno di costruzione (Cacace et al. 2016)

Questi risultati sono riassunti nella seguente tabella:

Anno di costruzione	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
<1919	64%	27%	8%	1%
1919 - 1945	41%	37%	19%	3%
1946 - 1961	17%	34%	33%	16%
1962 - 1971	5%	15%	33%	47%
1972 - 1981	24%	11%	28%	37%
> 1982	1%	4%	19%	76%

Tabella 8 Classi di vulnerabilità del costruito per anno di costruzione (Cacace et al. 2016)

Considerando un insieme generico di N edifici, per ciascuno dei quali sia noto l'anno di costruzione, è possibile ottenerne la distribuzione in classi di vulnerabilità secondo le seguenti espressioni:

$$A[\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i \cdot Z_{i1}}{N}$$

$$B[\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i \cdot Z_{i2}}{N}$$

$$C[\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i \cdot Z_{i3}}{N}$$

$$D[\%] = \frac{\sum_{i=1}^6 n_i \cdot Z_{i4}}{N}$$

In cui:

- > i=1:6 è un indice che rappresenta la classe di età (righe della tabella di inferenza);
- > n<sub>i</sub> è il numero di edifici relativo alla classe di età i-esima;
- > Z<sub>ij</sub> è la matrice di inferenza con l'indice j, variabile da 1 a 4, rappresentativo della classe di vulnerabilità (colonne della matrice);

Una volta nota lo spettro di vulnerabilità del costruito dell'unità territoriale considerata è possibile ottenere il valore medio dell'indice di vulnerabilità V<sub>m</sub> come media ponderata rispetto a questa distribuzione:

$$V_m = \frac{A \cdot v_{m,A} + B \cdot v_{m,B} + C \cdot v_{m,C} + D \cdot v_{m,D}}{100}$$

In cui con v<sub>m</sub> sono stati indicati i valori dell'indice di vulnerabilità medio associato a ciascuna classe.

Il parametro appena ricavato può essere modificato per tenere conto di un incremento o un decremento di vulnerabilità sulla base dell'altezza dell'edificio. Si somma un fattore pari a -0.08 per edifici di uno o due piani, riducendo l'indice di vulnerabilità, e un fattore +0.08 per edifici con un numero di piani superiore a 3. Considerando l'insieme degli edifici in esame, il valore del modificatore può essere ottenuto come media pesata rispetto al numero di edifici aventi una determinata altezza:

$$Mod_h = \frac{(-0.08) \cdot n_{np \leq 2} + n_{np=3} + 0.08 \cdot n_{np > 3}}{N}$$

Una ulteriore modifica al valore dell'indice di vulnerabilità può essere ottenuta considerando lo stato di conservazione dei manufatti. In relazione alla tipologia edilizia (M: muratura, RC: calcestruzzo armato) e dell'età di costruzione si adottano i seguenti modificatori di comportamento per tenere conto dell'influenza sulla risposta sismica dello stato di conservazione:

Categorie	Ottimo	Buono	Mediocre	Pessimo
I M<1919	-0.04	-0.02	0.06	0.08
II M=1919 ÷ 1945	-0.03	-0.02	0.04	0.06
III M=1945 1971	-0.02	-0.01	0.02	0.04
IV M=1971 ÷ 1981	-0.01	0	0.02	0.04
V M>1981	-0.01	0	0.02	0.04
VI RC<1971	-0.02	0	0.02	0.04

VII RC=1971÷1981	-0.01	0	0.01	0.02
VIII RC >1981	0	0	0	0

Tabella 9 Modificatori di comportamento sullo stato di conservazione (Cacace et al. 2016)

Ancora una volta, dovendo attribuire un valore del modificatore di comportamento  $Mod_{cons}$  non ad un singolo manufatto ma ad un insieme di edifici, è possibile procedere tramite una media pesata sul numero di edifici appartenenti ad una determinata classe.

Una volta quantificato l'effetto dell'altezza e dello stato di conservazione sul comportamento sismico, questi termini vengono sommati all'indice di vulnerabilità iniziale:

$$V = V_m + Mod_h + Mod_{cons}$$

Una volta ricavato il parametro di vulnerabilità finale, nota la forzante in termini di intensità macrosismica, è possibile ottenere la distribuzione in classi di danno degli edifici in esame.

Per determinare l'input sismico è possibile sfruttare le correlazioni esistenti tra intensità macrosismica e altre misure di scuotimento quali, ad esempio, la PGA. Possono essere condotte sia analisi di scenario tramite l'utilizzo di leggi di attenuazione, una volta note le caratteristiche dell'evento sismico, che valutazioni facenti uso di mappe statiche di accelerazione sismica di riferimento.

Tali approcci possono essere impiegati con successo, rispettivamente, in validazioni della procedura e nella produzione di mappe di danno.

Nell'applicazione della metodologia di scenario può essere impiegata la legge GMPE empirica sviluppata da Akkar, Bommer e Sandikkaya nel 2013 per mezzo di un ampio database europeo. Questa permette la valutazione dello spettro di risposta elastico in pseudo-accelerazione, nonché di altri parametri quali PGA e PGV, indotti a seguito di eventi sismici crostali puntiformi ed estesi. Rispetto ad altre leggi di attenuazione si ha il vantaggio di poter utilizzare una funzione di amplificazione del moto sismico non lineare, in funzione del parametro  $V_{s,30}$ .

Le espressioni impiegate da questo modello predittivo per l'accelerazione spettrale mediana  $Y$  sono le seguenti:

$$\ln(Y) = \ln[Y_{REF}(M_w, R, SoF)] + \ln[S(V_{s,30}, PGA_{REF})] + \epsilon\sigma$$

In cui:

Se  $M_w \leq c_1$

$$\ln(Y_{REF}) = a_1 + a_2(M_w - c_1) + a_3(8.5 - c_1)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \cdot \ln\left(\sqrt{R^2 + a_6^2}\right) + a_8F_N + a_9F_R + S$$

Se  $M_w > c_1$

$$\ln(Y_{REF}) = a_1 + a_7(M_w - c_1) + a_3(8.5 - c_1)^2 + [a_4 + a_5(M_w - c_1)] \cdot \ln\left(\sqrt{R^2 + a_6^2}\right) + a_8F_N + a_9F_R + S$$

Dove:

Se  $V_{s,30} \leq V_{ref}$

$$\ln(S) = b_1 \ln\left(\frac{V_{s,30}}{V_{ref}}\right) + b_2 \ln\left(\frac{PGA_{REF} + c \left(\frac{V_{s,30}}{V_{ref}}\right)^n}{(PGA_{REF} + c) \left(\frac{V_{s,30}}{V_{ref}}\right)^n}\right)$$

Se  $V_{s,30} > V_{ref}$

$$\ln(S) = b_1 \ln\left(\frac{\min(V_{s,30}, V_{CON})}{V_{ref}}\right)$$

Da cui si osserva che l'accelerazione spettrale mediana si ottiene modificando un termine di riferimento  $\ln(V_{ref})$  attraverso una funzione di amplificazione non lineare  $\ln(S)$ .

Gli altri termini del modello sono la magnitudo momento  $M_w$ , la distanza sorgente-sito  $R$  (che può essere, a seconda del modello, la distanza epicentrale, ipocentrale o la distanza di Joyner-Boore), due fattori  $F_N$  e  $F_R$  uguali ad uno se il meccanismo di faglia è normale o inverso e zero altrimenti. I valori della velocità delle onde di taglio nei primi trenta metri di riferimento e costante sono assunti, rispettivamente,  $V_{ref} = 750$  m/s e  $V_{con} = 1000$  m/s.

I coefficienti della regressione per distanza ipocentrale sono riportati di seguito a titolo esemplificativo:

Period(s)	a <sub>1</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>9</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	φ	τ	σ
(c)										
PGA	3.26685	-0.04846	-1.47905	-0.1091	0.0937	-0.41997	-0.28846	0.6475	0.3472	0.7347
0.01	3.28656	-0.04784	-1.48197	-0.1115	0.0953	-0.41729	-0.28685	0.6492	0.3481	0.7366
0.02	3.38936	-0.04796	-1.50214	-0.104	0.1029	-0.39998	-0.28241	0.6543	0.3508	0.7424
0.03	3.53155	-0.04537	-1.52781	-0.0973	0.1148	-0.34799	-0.26842	0.6685	0.3526	0.7558
0.04	3.68895	-0.03991	-1.55693	-0.0884	0.1073	-0.27572	-0.24759	0.6816	0.3513	0.7668
0.05	3.86581	-0.0349	-1.58672	-0.0853	0.1052	-0.21231	-0.22385	0.6899	0.3659	0.7809
0.075	4.18224	-0.02826	-1.62527	-0.0779	0.0837	-0.14427	-0.17525	0.6881	0.3942	0.793
0.10	4.4375	-0.03256	-1.65601	-0.0749	0.0761	-0.27064	-0.29293	0.6936	0.4122	0.8068
0.15	4.52949	-0.04509	-1.63467	-0.0265	0.0545	-0.48313	-0.39551	0.7048	0.3779	0.7997
0.20	4.1775	-0.05565	-1.53574	0	0.0493	-0.65315	-0.44644	0.6954	0.3848	0.7948
0.30	3.57698	-0.0749	-1.38832	0	0.0469	-0.82609	-0.45730	0.6934	0.3896	0.7954
0.40	3.03752	-0.09243	-1.26045	0	0.04	-0.89517	-0.43008	0.7037	0.3894	0.8043
0.50	2.77997	-0.10964	-1.20953	0	0.0271	-0.94614	-0.37408	0.6821	0.4017	0.7916
0.75	1.91625	-0.13547	-1.05027	0	0.0141	-1.00786	-0.28957	0.7028	0.389	0.8033
1.00	1.43982	-0.15427	-0.97812	0	0	-1.01331	-0.28702	0.7022	0.3826	0.7997
1.50	0.83007	-0.18248	-0.90319	0	0	-0.98071	-0.24695	0.7378	0.3758	0.828
2.00	0.40614	-0.20136	-0.86343	0	-0.009	-0.91007	-0.17336	0.7446	0.3676	0.8304
3.00	-0.22534	-0.22564	-0.83314	0	-0.0683	-0.85793	-0.13336	0.7154	0.4019	0.8206
4.00	-0.51893	-0.25256	-0.80922	0	-0.2231	-0.75645	-0.07749	0.6364	0.3318	0.7177
PGV	6.72743	-0.11474	-1.17694	-0.0616	0.063	-0.72057	-0.19688	0.628	0.3312	0.71

Figura 23 Coefficienti per distanza ipocentrale

Per eventi sismici di natura vulcanica è possibile utilizzare, nell'approccio di scenario, specifiche leggi di attenuazione sviluppate sulla base di database empirici reperiti in queste aree.

Un esempio è la GMPE di Tusa e Langer per la quale sono stati impiegati dati provenienti da 91 terremoti dell'area Etna. Questa si differenzia in due casi: eventi superficiali ed eventi profondi, diversi in termini di contenuto in frequenza.

Per approcci mappali di tipo statico, invece, è possibile riferirsi al sito dell'INGV una volta scelto il periodo di ritorno relativo all'analisi da condurre.

La correlazione che intercorre tra il parametro PGA e l'intensità macrosismica EMS-98 è scelta nella legge Cauzzi-Faccioli (2006).

La relazione tra il danno e le perdite economiche può essere ricavata a partire dall'allegato A al D.M. 65 del 07/03/2017 all'interno del quale è riportata una tabella di collegamento tra un determinato Stato Limite della struttura e la percentuale del costo di ricostruzione CR [%] associato a ciascuno di essi:

Stato Limite	CR(%)
SLR	100%
SLC	80%
SLV	50%
SLD	15%
SLO	7%
SLID	0%

Figura 24 Relazione tra Stati Limite e percentuale del Costo di Ricostruzione (D.M. 65 del 07/03/2017)

Associando a ciascuno Stato Limite un livello di danno, secondo la seguente tabella, è possibile ricavare il polinomio passante per le coppie (Di,CRi) e, successivamente, stimare il costo complessivo di ricostruzione fissando CR = 1200€/mq.

Stato Limite	Stato di Danno
SLO	D1
SLD	D2
SLV	D3
SLC	D4
SLR	D5

Tabella 10 Corrispondenza tra Stati Limite e Stati di Danno

Le persone sfollate vengono ricavate sulla base dell'entità della popolazione e degli edifici risultati inagibili tramite l'equazione:

$$sfollati = popolazione\ tot. \cdot edifici\ inagibili[\%]$$

La percentuale di edifici inagibili può essere ricavata, in riferimento al progetto Syner-G, tramite la seguente tabella in funzione del danno agli edifici:

Usability Ratio	Damage Level					
	D0	D1	D2	D3	D4	D5
FU – Fully Usable	0,87	0,69	0,17	0,02	0,00	0,01
PU – Partially Usable	0,13	0,31	0,45	0,21	0,04	0,01
NU – Non Usable	0,00	0,00	0,38	0,77	0,96	0,98

Figura 25 Agibilità sulla base del danno (Progetto Syner-G)

Per quanto riguarda le persone coinvolte in crolli si ha:

$$\text{coivolti in crolli} = \text{popolazione tot.} \cdot 0.3$$

Per descrivere l'impatto dell'evento sismico è possibile utilizzare il sistema P.A.G.E.R. – U.S.G.S. (Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response) il quale definisce una scala basata sulle stime delle perdite economiche e delle perdite in termini di vite umane secondo la seguente tabella:

Alert Level and Color	Estimated Fatalities	Estimated Losses (USD)
Red	1,000+	\$1 billion+
Orange	100 - 999	\$100 million - \$1 billion
Yellow	1 - 99	\$1 million - \$100 million
Green	0	< \$1 million

Figura 26 Livelli di allerta del sistema P.A.G.E.R. (<https://earthquake.usgs.gov/data/pager/background.php>)

### 3.2 Dati di base

I dati censuari sull'edilizia residenziale, comprensivi delle caratteristiche tipologiche e costruttive necessarie per l'analisi, sono ricavabili dal sito dell'ISTAT (<https://www.istat.it>). L'analisi viene condotta per sezioni censuarie, unità territoriale tale da descrivere il territorio in maniera sufficientemente densa.

In particolare, oltre ai codici identificativi e alle coordinate geografiche delle singole sezioni, per l'analisi di vulnerabilità sono necessari i seguenti record:

- P1 Popolazione residente – totale
- A2 Abitazioni occupate da almeno una persona residente
- A44 Superficie delle abitazioni occupate da almeno una persona residente
- E3 Edifici ad uso residenziale
- E8 Edifici ad uso residenziale costruiti prima del 1919
- E9 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1919 al 1945
- E10 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1946 al 1960
- E11 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1961 al 1970
- E12 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1971 al 1980
- E13 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1981 al 1990
- E14 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 1991 al 2000
- E15 Edifici ad uso residenziale costruiti dal 2001 al 2005
- E16 Edifici ad uso residenziale costruiti dopo il 2005
- E17 Edifici ad uso residenziale con un piano
- E18 Edifici ad uso residenziale con 2 piani
- E19 Edifici ad uso residenziale con 3 piani
- E20 Edifici ad uso residenziale con 4 piani o più
- E28 Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione ottimo
- E29 Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione buono
- E30 Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione mediocre
- E31 Edifici ad uso residenziale con stato di conservazione pessimo

I dati necessari per la definizione dell'input sismico sono per lo più reperibili sul sito dell'INGV (<http://esse1.mi.ingv.it/>) e sulla base delle caratteristiche dell'evento sismico e della sua sorgente.

### 3.3 Risultati delle elaborazioni

Di seguito vengono presentate le mappe ricavate dall'applicazione della procedura descritta ai paragrafi precedenti che illustrano il danno all'edilizia residenziale rispetto alla pericolosità sismica INGV in termini di PGA per un tempo di ritorno di 475 anni:

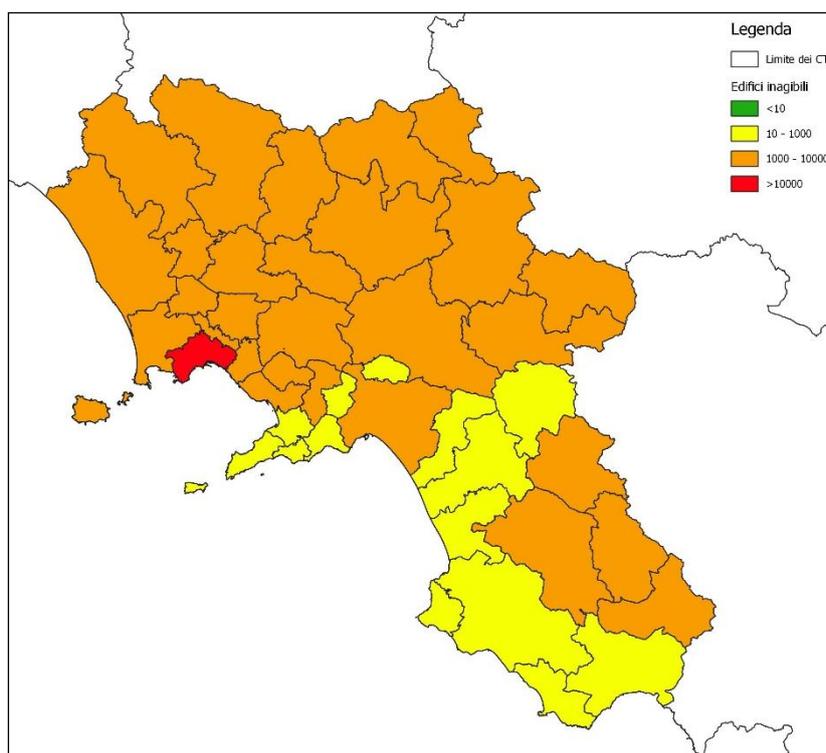


Figura 27 Mappa regionale del numero degli edifici inagibili attesi per Contesto Territoriale

Nella seguente tabella viene riportato, per ogni Contesto Territoriale, il numero degli edifici inagibili attesi.

N°	Contesto Territoriale	Edifici inagibili
1	NAPOLI	10384
2	NOLA	7812
3	BENEVENTO	7748
4	CAIVANO	7077
5	ARIANO IRPINO	6798
6	AVELLINO	6519
7	POZZUOLI	5689
8	CASERTA	5577
9	PIEDIMONTE MATESE	5264
10	TELESE TERME	5187

11	TORRE DEL GRECO	3997
12	MONTESARCHIO	3468
13	ARZANO	3220
14	AVERSA	3169
15	SAN GIORGIO A CREMANO	3084
16	SAN MARCO DEI CAVOTI	3053
17	VALLATA	2862
18	SAN GIUSEPPE VESUVIANO	2857
19	SANT'ANGELO DEI LOMBARDI	2768
20	SALA CONSILINA	2764
21	SALERNO	2504
22	MONDRAGONE	2416
23	TEANO	2359
24	PADULA	1772
25	SARNO	1680
26	BUCCINO	1504
27	SAN BARTOLOMEO IN GALDO	1315
28	ROCCADASPIDE	1101
29	SANTA MARIA CAPUA VETERE	1063
30	ISCHIA	1054
31	SAPRI	951
32	NOCERA INFERIORE	908
33	OLIVETO CITRA	823
34	CASTELLAMMARE DI STABIA	768
35	VALLO DELLA LUCANIA	756
36	EBOLI	637
37	BATTIPAGLIA	597
38	SORRENTO	588
39	SOLOFRA	364
40	CAPACCIO	352
41	AMALFI	252
42	CAMEROTA	197
43	POSITANO	168
44	CAPRI	101
45	CASTELLABATE	69

Tabella 11 Classifica regionale della priorità di intervento in base al numero degli edifici inagibili attesi

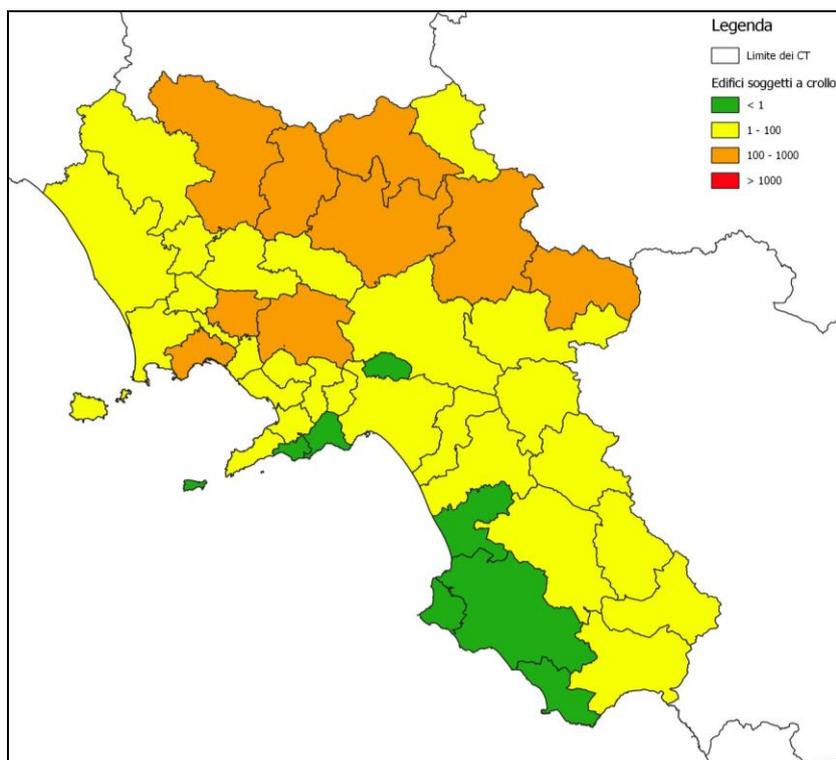


Figura 28 Mappa regionale degli edifici soggetti a crollo attesi

Nella seguente tabella viene riportato, per ogni Contesto Territoriale, il numero degli edifici soggetti a crollo.

N°	Contesto Territoriale	Edifici soggetti a crollo
1	NAPOLI	868
2	TELESE TERME	357
3	BENEVENTO	249
4	PIEDIMONTE MATESE	229
5	CAIVANO	181
6	VALLATA	150
7	SAN MARCO DEI CAVOTI	142
8	ARIANO IRPINO	123
9	NOLA	117
10	AVELLINO	99
11	PADULA	95
12	SANT'ANGELO DEI LOMBARDI	85
13	SALA CONSILINA	84
14	ARZANO	70
15	MONTESARCHIO	67
16	SAN GIORGIO A CREMANO	64

17	POZZUOLI	59
18	CASERTA	44
19	TORRE DEL GRECO	43
20	AVERSA	29
21	BUCCINO	27
22	SAN BARTOLOMEO IN GALDO	23
23	SAN GIUSEPPE VESUVIANO	22
24	TEANO	15
25	SALERNO	11
26	SARNO	9
27	SANTA MARIA CAPUA VETERE	8
28	ROCCADASPIDE	8
29	OLIVETO CITRA	7
30	MONDRAGONE	4
31	ISCHIA	4
32	SAPRI	4
33	CASTELLAMMARE DI STABIA	3
34	NOCERA INFERIORE	3
35	EBOLI	2
36	BATTIPAGLIA	2
37	SORRENTO	1
38	VALLO DELLA LUCANIA	1
39	SOLOFRA	1
40	CAPACCIO	0
41	AMALFI	0
42	CAMEROTA	0
43	POSITANO	0
44	CAPRI	0
45	CASTELLABATE	0

Tabella 12 Classifica regionale della priorità di intervento in base agli edifici soggetti a crollo

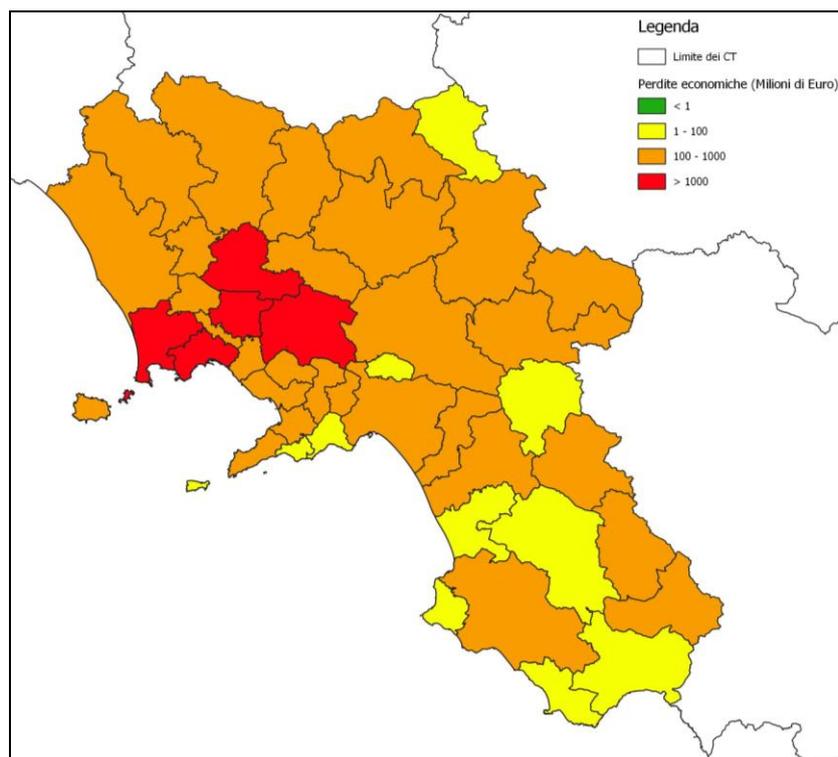


Figura 29 Mappa regionale delle perdite economiche in milioni di euro

Nella seguente tabella viene riportato, per ogni Contesto Territoriale, le perdite economiche espresse in milioni di euro.

N°	Contesto Territoriale	Perdite economiche (in milioni di euro)
1	NAPOLI	5586.27
2	POZZUOLI	1307.07
3	CAIVANO	1304.86
4	CASERTA	1094.29
5	NOLA	1091.29
6	SAN GIORGIO A CREMANO	937.72
7	BENEVENTO	926.46
8	SALERNO	894.47
9	AVELLINO	891.38
10	ARZANO	827.60
11	TORRE DEL GRECO	825.50
12	AVERSA	652.26
13	ARIANO IRPINO	468.07
14	PIEDIMONTE MATESE	421.90
15	TELESE TERME	403.54
16	SAN GIUSEPPE VESUVIANO	334.75
17	MONTESARCHIO	333.03
18	MONDRAGONE	327.23

19	SARNO	296.27
20	CASTELLAMMARE DI STABIA	281.81
21	SANTA MARIA CAPUA VETERE	262.31
22	NOCERA INFERIORE	250.12
23	TEANO	231.85
24	SALA CONSILINA	218.55
25	BATTIPAGLIA	207.07
26	SAN MARCO DEI CAVOTI	198.15
27	SANT'ANGELO DEI LOMBARDI	174.93
28	SORRENTO	165.42
29	EBOLI	140.57
30	ISCHIA	137.51
31	VALLO DELLA LUCANIA	126.52
32	PADULA	118.58
33	BUCCINO	110.95
34	VALLATA	109.04
35	SAPRI	88.60
36	ROCCADASPIDE	80.52
37	OLIVETO CITRA	77.24
38	SOLOFRA	68.57
39	CAPACCIO	65.55
40	SAN BARTOLOMEO IN GALDO	62.17
41	AMALFI	46.98
42	POSITANO	24.94
43	CAMEROTA	24.38
44	CAPRI	16.76
45	CASTELLABATE	13.25

Tabella 13 Classifica regionale della priorità di intervento in base alle perdite economiche in milioni di euro

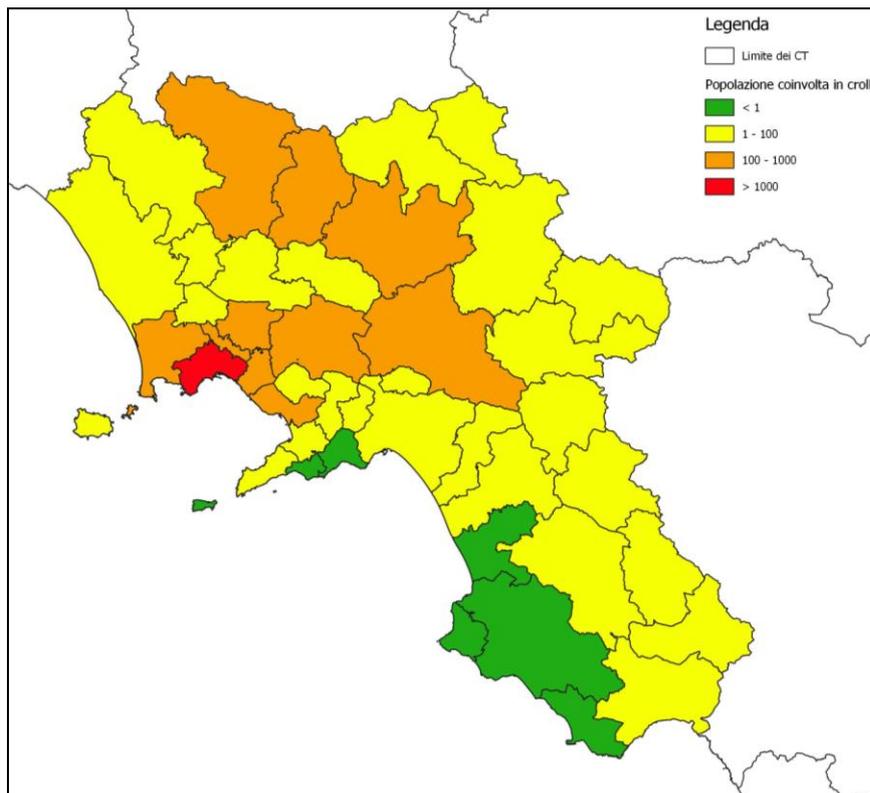


Figura 30 Mappa regionale della percentuale di popolazione coinvolta in crolli

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, la popolazione coinvolta in crolli.

N°	Contesto Territoriale	Popolazione coinvolta in crolli
1	NAPOLI	7778.11
2	BENEVENTO	602.23
3	CAIVANO	520.78
4	SAN GIORGIO A CREMANO	325.23
5	ARZANO	303.45
6	TELESE TERME	241.08
7	NOLA	209.53
8	PIEDIMONTE MATESE	186.90
9	POZZUOLI	177.30
10	TORRE DEL GRECO	161.74
11	AVELLINO	146.87
12	ARIANO IRPINO	98.44
13	CASERTA	93.44
14	SAN MARCO DEI CAVOTI	84.55
15	AVERSA	81.04
16	PADULA	57.60
17	SALA CONSILINA	56.15
18	MONTESARCHIO	56.12

19	SANT'ANGELO DEI LOMBARDI	51.87
20	SALERNO	49.67
21	VALLATA	49.26
22	SAN GIUSEPPE VESUVIANO	36.72
23	CASTELLAMMARE DI STABIA	26.85
24	SANTA MARIA CAPUA VETERE	24.65
25	BUCCINO	22.01
26	SARNO	17.07
27	TEANO	11.31
28	NOCERA INFERIORE	8.30
29	SAN BARTOLOMEO IN GALDO	7.37
30	ISCHIA	6.50
31	OLIVETO CITRA	5.60
32	SORRENTO	5.09
33	MONDRAGONE	4.90
34	ROCCADASPIDE	4.87
35	BATTIPAGLIA	4.44
36	EBOLI	3.72
37	SAPRI	3.67
38	SOLOFRA	1.02
39	VALLO DELLA LUCANIA	0.73
40	AMALFI	0.70
41	CAPACCIO	0.34
42	POSITANO	0.10
43	CAMEROTA	0.10
44	CAPRI	0.03
45	CASTELLABATE	0.01

Tabella 14 Classifica regionale della priorità di intervento in base alla popolazione coinvolta in crolli

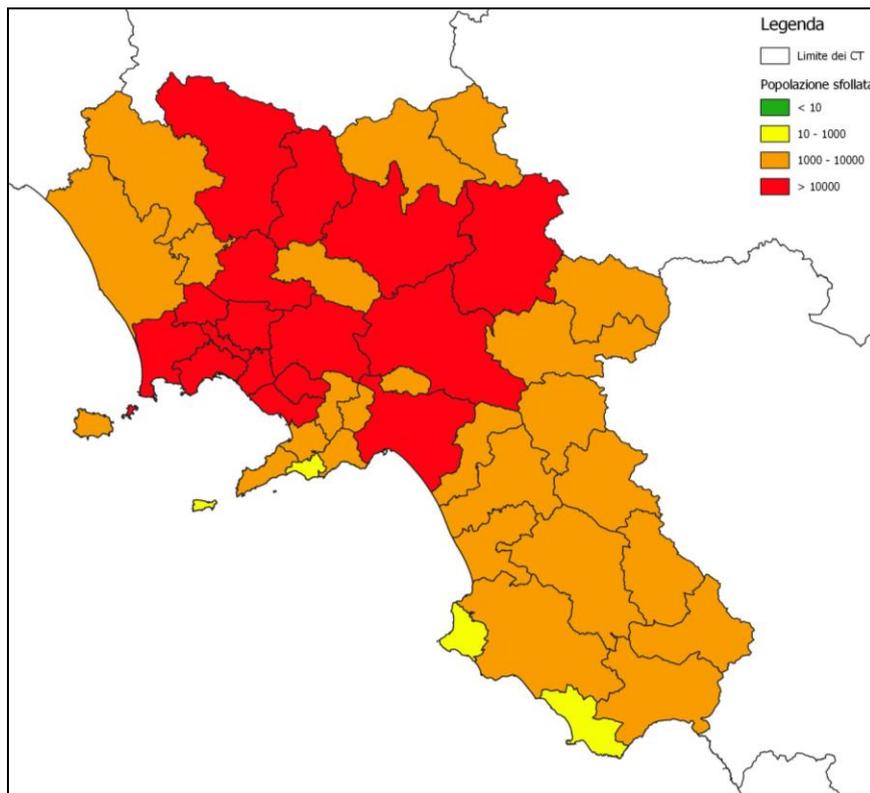


Figura 31 Mappa regionale della popolazione sfollata

Nella seguente tabella viene riportata, per ogni Contesto Territoriale, la popolazione sfollata.

N°	Contesto Territoriale	Popolazione sfollata
1	NAPOLI	222415.06
2	CAIVANO	56141.99
3	POZZUOLI	49223.09
4	SAN GIORGIO A CREMANO	37564.66
5	ARZANO	37160.45
6	NOLA	36959.76
7	CASERTA	33619.58
8	TORRE DEL GRECO	31303.81
9	BENEVENTO	30160.61
10	AVELLINO	25682.08
11	SALERNO	24679.49
12	AVERSA	23644.58
13	ARIANO IRPINO	14449.16
14	PIEDIMONTE MATESE	12347.15
15	SAN GIUSEPPE VESUVIANO	11960.09
16	TELESE TERME	11385.57
17	MONTESARCHIO	9546.78
18	SARNO	9409.22

19	CASTELLAMMARE DI STABIA	9191.81
20	SANTA MARIA CAPUA VETERE	7655.15
21	MONDRAGONE	7106.53
22	NOCERA INFERIORE	6972.64
23	SALA CONSILINA	6039.76
24	SAN MARCO DEI CAVOTI	5701.98
25	TEANO	5669.79
26	BATTIPAGLIA	5380.46
27	SANT'ANGELO DEI LOMBARDI	5151.33
28	SORRENTO	4549.53
29	ISCHIA	3597.90
30	EBOLI	3514.57
31	PADULA	3496.89
32	BUCCINO	3475.34
33	VALLATA	3412.50
34	SAPRI	2269.74
35	OLIVETO CITRA	2250.00
36	ROCCADASPIDE	2014.22
37	VALLO DELLA LUCANIA	1979.98
38	SOLOFRA	1733.45
39	SAN BARTOLOMEO IN GALDO	1688.54
40	AMALFI	1266.17
41	CAPACCIO	1078.33
42	POSITANO	498.02
43	CAMEROTA	406.48
44	CAPRI	306.60
45	CASTELLABATE	138.89

Tabella 15 Classifica regionale della priorità di intervento in base alla popolazione sfollata

### 3.4 Validazione

La procedura è stata applicata per 8 diversi eventi sismici in modo da poter costruire un utile confronto in termini di danno all'edilizia residenziale e alla popolazione coinvolta.

Di seguito sono riassunte i casi ai quali è stata applicata la metodologia e i risultati ottenuti:

Evento	X ED50 UTM Zone 32N	X ED50 UTM Zone 32N	M <sub>w</sub>	Stile di faglia	Profondità [km]	Intensità macrosismica EMS-98 minima considerata
1. Terremoto di Santo Stefano 26/12/2018	1040286.5	4183722.1	4.90	Vulcanico	1.55	6
2. Lunigiana 21/06/2013	591282.7	4887140.9	5.10	Normale	7.00	6
3. San Giuliano di Puglia 31/10/2002	993537.6	4633685.4	5.70	Trascorrente	10.00	6

4. Mormanno 25/10/2012	1100716.7	4437175.0	5.20	Normale	9.70	6
5. Abruzzo 07/05/1984	921068.4	4625256.4	5.86	Normale	10.00	6
6. Umbria Marche 26/09/1997	820256.3	4770621.2	6.00	Normale	6.00	6
7. L'Aquila 06/04/2009	860853.3	4696910.1	6.10	Normale	8.00	6
8. Emilia 20/05/2012	678516.9	4974524.4	5.83	Inversa	10.00	6

Tabella 16 Eventi sismici oggetto di validazione della metodologia

Si ottengono i seguenti risultati dei quali viene riportato il confronto con dati ufficiali. I colori delle tabelle si riferiscono al sistema P.A.G.E.R. USGS per la stima dell'impatto del sisma.

### 3.4.1 Terremoto di Santo Stefano del 26/12/2018

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
1	Scenario Test	Valore Min.	41	0	43	0	121	0	9
		Valore Med.	85	0	88	0	228	0	13
		Valore Max.	173	0	182	0	516	0	19

Il dato ufficiale della Protezione Civile Siciliana vede 1273 abitazioni inagibili e 1334 sfollati.

### 3.4.2 Terremoto Lunigiana del 21/06/2013

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
2	Scenario Test	Valore Min.	793	2	1323	3	2988	2	174
		Valore Med.	1449	7	2394	14	4740	9	255
		Valore Max.	2806	30	4642	56	10603	37	368

Il dato ufficiale della Regione Toscana vede un totale di 1180 edifici inagibili.

### 3.4.3 Terremoto San Giuliano di Puglia del 31/10/2002

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
3	Scenario Test	Valore Min.	1807	9	1388	7	3192	4	116
		Valore Med.	2793	40	2178	29	4180	19	164
		Valore Max.	5053	145	3963	106	9196	71	224

I dati ufficiali resi disponibili dal Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, ad un mese dal terremoto, indicavano, oltre alle trenta vittime, le seguenti cifre: 62 comuni richiedenti assistenza a vario titolo, 5500 sfollati, 21 tendopoli allestite, 2930 edifici parzialmente agibili, 3883 edifici inagibili, 23 abitazioni crollate.

### 3.4.4 Terremoto Mormanno del 25/10/2012

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
4	Scenario Test	Valore Min.	181	0	173	0	394	0	21
		Valore Med.	325	2	315	1	621	1	30
		Valore Max.	616	7	601	6	1380	4	43

Il dato ufficiale è di 400 abitazioni inagibili e nessun crollo.

### 3.4.5 Terremoto Abruzzo del 07/05/1984

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
5	Scenario Test	Valore Min.	1152	6	1067	5	2476	3	124
		Valore Med.	1864	25	1802	19	3625	12	179
		Valore Max.	3486	86	3417	67	8062	44	254

Il dato ufficiale parla di 6000 sfollati e 1767 abitazioni inagibili.

### 3.4.6 Terremoto Umbria Marche del 26/09/1997

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
6	Scenario Test	Valore Min.	1932	36	1705	22	3862	14	202
		Valore Med.	2788	102	2741	62	5401	41	292
		Valore Max.	5213	251	5229	159	12068	104	413

Il dato ufficiale vede di 80 abitazioni crollate oltre a 11 vittime e 100 feriti.

### 3.4.7 Terremoto L'Aquila 06/04/2009

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
7	Scenario Test	Valore Min.	4922	120	8234	226	20353	159	468
		Valore Med.	6037	355	9428	665	19054	473	618
		Valore Max.	10964	874	16931	1621	42318	1168	787

Il dato ufficiale parla di 305 vittime e 38000 sfollati.

### 3.4.8 Terremoto Emilia 20/05/2012

Evento		Edifici inagibili	Edifici crollati	Abitazioni inagibili	Abitazioni crollate	Pop. sfollata	Pop. coinvolta in crolli	Perdite economiche [mln €]	
8	Scenario Test	Valore Min.	2559	7	4025	10	9720	7	629
		Valore Med.	4556	32	7304	44	15310	32	919
		Valore Max.	8730	118	14124	167	34155	119	1315

Il dato ufficiale complessivo per le due scosse da Regione Emilia-Romagna vede:

- > 9000 edifici inagibili;
- > 4500 parzialmente inagibili;
- > 31000 abitazioni inagibili;
- > 3,3 miliardi di euro danni stimati;
- > Circa 42000 persone evacuate.

## Bibliografia

M.A. Nowicki Jessee, M.W. Hamburger, K. Allstadt, D.J. Wald, S.M. Robeson, H. Tanyas, M. Hearne, E.M. Thompson. A Global Empirical Model for Near-Real-Time Assessment of Seismically Induced Landslides. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 123:1835-1859 (2018) doi: 10.1029/2017JF004494

J. Zhu, L. G. Baise, E. M. Thompson. An Updated Geospatial Liquefaction Model for Global Application. *Bulletin of the Seismological Society of America* 107:3 (2017) doi: 10.1785/0120160198

S. Lagomarsino, S. Giovinazzi. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 4:415-443 (2006) doi: 10.1007/s10518-006-9024-z

F. Cacace, G. Zuccaro, D. De Gregorio, F. L. Perelli. Building Inventory at National scale by evaluation of seismic vulnerability classes distribution based on Census data analysis: BINC procedure. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 28:384-393 (2016)

S. Akkar, M. A. Sandikkaya, J. J. Bommer. Empirical ground-motion models for point- and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East. *Bulletin of Earthquake Engineering* (2013) doi: 10.1007/s10518-013-9461-4

G.Tusa, H. Langer. Prediction of ground-motion parameters for the volcanic area of Mount Etna. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania - Osservatorio Etneo Piazza Roma 2, 25125 Catania, Italy

R.Paolucci, C.Smerzini. Empirical evaluation of peak ground velocity and displacement as a function of elastic spectral ordinates for design. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2017;1-11. <https://doi.org/10.1002/eqe.2943>

A. Valagussa, P.Frattini, G.B.Crosta. Earthquake-induced rockfall hazard zoning. *Engineering Geology* Volume 182, Part B, 19 November 2014, Pages 213-225. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.009>

P. Galli. New empirical relationships between magnitude and distance for liquefaction. *Tectonophysics* 324 (2000) 169-187