



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE

# Elementi di geofisica per la Protezione Civile

Giovanni Costa - [costa@units.it](mailto:costa@units.it)

# Terremoto: dimensione

Esistono due metodi per descrivere l'entità di un terremoto. L'**intensità** del terremoto è un parametro soggettivo che si basa sulla valutazione degli effetti visibili.

Dipende quindi da fattori diversi dalla dimensione effettiva del terremoto. La **magnitudo** di un terremoto è determinata strumentalmente ed è una misura più oggettiva delle sue dimensioni, ma dice poco direttamente sulla gravità degli effetti che ne derivano.

Illogicamente, di solito è la magnitudo che viene riportata nei notiziari di un terremoto importante, mentre l'intensità è un parametro più appropriato per descrivere la gravità degli effetti sull'uomo e sull'ambiente.



- I grandi terremoti producono alterazioni delle caratteristiche naturali della superficie terrestre o gravi danni alle strutture costruite dall'uomo, come edifici, ponti e dighe. Anche piccoli terremoti possono provocare danni sproporzionati a questi edifici se sono stati utilizzati metodi o materiali di costruzione scadenti. L'intensità di un terremoto in un determinato luogo viene classificata in base al carattere locale degli effetti visibili che produce.
- Dipende molto dall'acutezza dell'osservatore ed è in linea di principio soggettiva. Tuttavia, le stime dell'intensità si sono dimostrate un metodo valido per valutare le dimensioni dei terremoti, compresi quelli storici.
- Il primo tentativo di classificare la gravità dei terremoti fu fatto alla fine del XVIII secolo da Domenico Pignataro, un medico italiano, che classificò più di 1000 terremoti che devastarono la provincia meridionale della Calabria negli anni 1783-1786. La sua analisi grossolana classificò i terremoti a seconda che fossero molto forti, forti, moderati o lievi.
- A metà del XIX secolo un ingegnere irlandese, Robert Mallet, stilò un elenco di 6831 terremoti e ne tracciò la posizione stimata, producendo la prima mappa della sismicità mondiale e stabilendo che i terremoti si verificavano in zone distinte. Utilizzò anche una scala di intensità a quattro stadi per classificare i danni dei terremoti e costruì le prime mappe isosismiche con linee che delineavano aree con gradi di danno sostanzialmente uguali.

- La scala di intensità Rossi-Forel, sviluppata alla fine del XIX secolo dallo scienziato italiano M. S. de Rossi e dallo scienziato svizzero F. Forel, comprendeva dieci stadi che descrivevano effetti di danno crescente.
- Nel 1902 un sismologo italiano, G. Mercalli, propose una scala di intensità ancora più estesa e ampliata che riclassificava la gravità dei terremoti in dodici stadi.
- Una variante, la scala Modified Mercalli (MM), fu sviluppata nel 1931 per adattarsi alle condizioni di costruzione negli Stati Uniti, dove una successiva modifica è di uso comune. La scala Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK), introdotta in Europa nel 1964 e modificata nel 1981, ha anch'essa dodici stadi e differisce dalla scala MM soprattutto nei dettagli.
- Nel 1998 è stata adottata una nuova scala macrosismica europea (EMS-98), una versione abbreviata. La nuova scala EMS a 12 stadi si basa sulla scala MSK, ma tiene conto della vulnerabilità degli edifici al danno sismico e incorpora una valutazione più rigorosa dell'entità del danno alle strutture con diversi standard edilizi.

## a) Compilata da Mercalli e modificata nel 1931

- I. Non avvertito
- II. Avvertito negli interni solo da poche persone per lo più nei piani alti delle case e da persone in posizione favorevole
- III. Avvertito negli interni ove gli oggetti pendenti oscillano. Vibrazioni come se passassero camion leggeri. E' possibile stimarne la durata. Può non essere riconosciuto come un terremoto.
- IV. Gli oggetti pendenti oscillano. Vibrazioni come se passassero camion pesanti, oppure sensazione di colpo secco come quello di una palla pesante contro un muro. Le automobili ferme oscillano. Finestre, piatti, bicchieri e porte vibrano. Al limite superiore del IV grado le pareti di legno e gli infissi si incrinano.
- V. Avvertito anche esternamente. Coloro che dormono si svegliano. I liquidi oscillano e a volte traboccano. Piccoli oggetti instabili si muovono e si ribaltano. Le porte si aprono e si chiudono. Imposte e quadri si muovono. Gli orologi a pendolo si fermano o cominciano a funzionare e cambiano periodo di oscillazione.
- VI. Avvertito da tutti. Molti impauriti corrono fuori dagli edifici. Finestre, piatti, bicchieri si rompono. Cadono i libri dagli scaffali ed i quadri dalle pareti. I mobili si muovono o si rovesciano. Le costruzioni fragili si incrinano. Piccole campane (come quelle delle chiese e delle scuole) suonano. Gli alberi ed i cespugli ondeggiano.
- VII. Difficile reggersi in equilibrio. Avvertito da quelli che sono alla guida di una automobile. I mobili si rompono. Danni moderati alle costruzioni in fango. Camini fragili si rompono alla base. Cadono intonaci, mattoni sciolti, pietre, cornicioni. Qualche incrinatura nelle costruzioni in pietra. Si formano onde nelle pozzanghere l'acqua diventa torbida con fango. Piccole frane e avvalamenti nei banchi di sabbia e ghiaia. Campane grandi suonano. Canali d'irrigazione in cemento sono danneggiati.
- VIII. La guida delle automobili è difficile. Danni alle costruzioni in pietra; collasso parziale. Qualche danno di stucchi e di qualche muro in mattoni. Oscillazioni o crollo di camini, ciminiera, monumenti, torri, serbatoi sospesi. Gli edifici oscillano sulle fondamenta; i tramezzi cadono. Si spezzano i rami degli alberi. Il flusso e la temperatura di sorgenti e di pozzi cambiano. Si formano fratture nel terreno umido e in forti pendenze.
- IX. Panico generale. Costruzioni di fango completamente distrutte; costruzioni in pietra fortemente danneggiate, a volte un collasso totale; costruzioni in mattoni seriamente danneggiate. Gli edifici crollano o sono spostati dalle fondamenta. Forti danni ai serbatoi. I tubi sotterranei si rompono. Si formano fratture cospicue nel terreno. In aree alluvionali sono spruzzati sabbia e fango; si formano crateri di sabbia.
- X. La maggioranza delle costruzioni è distrutta. Le strutture in legno, anche se ben costruite, ed i ponti sono distrutti. Forti danni alle dighe, ai canali di irrigazione e agli argini. Grandi frane. Invasione di acqua proveniente da canali, fiumi, laghi, ecc. Sabbia e fango sono spostati orizzontalmente sulle spiagge e nelle regioni pianeggianti. Le rotaie sono leggermente incurvate.
- XI. Le rotaie sono fortemente incurvate. I tubi sotterranei sono completamente inutilizzabili.
- XII. Danno quasi totale. Grandi massi di roccia spostati. La morfologia è alterata. Oggetti lanciati in aria.



Intensity	Description of effects
<i>I–IV light to moderate earthquakes</i>	
I	<b>Not felt</b>
II	<b>Scarcely felt</b> Felt only by a few individual people at rest in houses.
III	<b>Weak</b> Felt indoors by a few people. People at rest feel a swaying or light trembling.
IV	<b>Largely observed</b> Felt indoors by many people; outdoors by very few. A few people are awakened. Windows, doors and dishes rattle.
<i>V–VIII moderate to severe earthquakes</i>	
V	<b>Strong</b> Felt indoors by most, outdoors by few. Many sleeping people awake. A few are frightened. Buildings tremble throughout. Hanging objects swing considerably. Small objects are shifted. Doors and windows swing open or shut.
VI	<b>Slightly damaging</b> Many people are frightened and run outdoors. Some objects fall. Many houses suffer slight non-structural damage like hair-line cracks and fall of small pieces of plaster.
VII	<b>Damaging</b> Most people are frightened and run outdoors. Furniture is shifted and objects fall from shelves in large numbers. Many well built ordinary buildings suffer moderate damage: small cracks in walls, fall of plaster, parts of chimneys fall down; older buildings may show large cracks in walls and failure of fill-in walls.
VIII	<b>Heavily damaging</b> Many people find it difficult to stand. Many houses have large cracks in walls. A few well built ordinary buildings show serious failure of walls, while weak older structures may collapse.
<i>IX–XII severe to destructive earthquakes</i>	
IX	<b>Destructive</b> General panic. Many weak constructions collapse. Even well built ordinary buildings show very heavy damage: serious failure of walls and partial structural failure.
X	<b>Very destructive</b> Many ordinary well built buildings collapse.
XI	<b>Devastating</b> Most ordinary well built buildings collapse, even some with good earthquake resistant design are destroyed.
XII	<b>Completely devastating</b> Almost all buildings are destroyed.

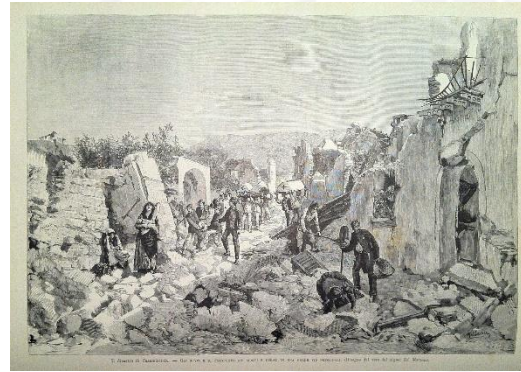
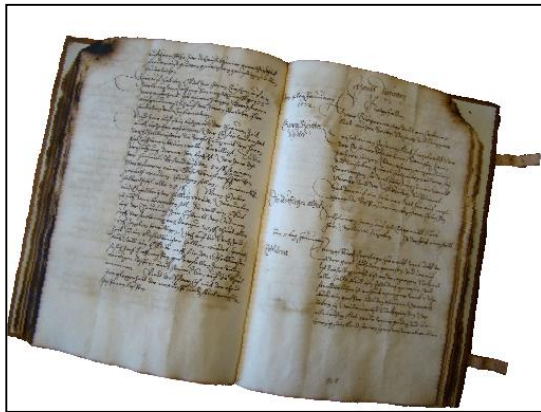
Damage %	Rossi-Forel	Modified Mercalli	Geoflan	PRC	JMA	MSK
0	I	I	I	I	0	I
			II			
	II	II	III	II	I	II
			III			
	III	III	IV	IV	II	III
			IV			
	IV	IV	V	V	III	IV
			V			
	V	V	VI	VI	IV	V
			VI			
	VI	VI	VII	VII	V	VI
			VII			
VII	VII	VIII	VIII	V	VII	
		VIII				VIII
VIII	VIII	IX	IX	VI	VIII	
		IX				IX
IX	IX	X	X	VI	IX	
		X				X
X	X	XI	XI	VII	X	
		XI				XI
XI	XI	XII	XII	VII	XI	
		XII				XII
XII	XII	XIII	XIII	VII	XII	
		XIII				XIII

Figure 1

## SCALA MERCALLI

I	- Strumentale	Avvertita solo dagli strumenti
II	- Debole	Avvertita solo da poche persone sensibili in condizioni particolari
III	- Leggera	Avvertita da poche persone
IV	- Moderata	Avvertita da molte persone; tremiti di infissi e cristalli; oscillazione di oggetti sospesi
V	- Piuttosto forte	Avvertita da molte persone, anche addormentate; caduta di oggetti
VI	- Forte	Qualche lesione agli edifici
VII	- Molto forte	Caduta di comignoli; lesione agli edifici
VIII	- Distruttiva	Rovina parziale di alcuni edifici; vittime isolate
IX	- Rovinosa	Rovina totale di alcuni edifici; molte vittime; crepacci nel suolo
X	- Disastrosa	Crollo di parecchi edifici; numerose vittime; crepacci evidenti nel terreno
XI	- Molto disastrosa	Distruzione di agglomerati urbani; moltissime vittime; crepacci; frane; maremoto
XII	- Catastrofica	Danneggiamento totale; distruzione di ogni manufatto; pochi superstiti; sconvolgimento del suolo; maremoto

# Terremoto: intensità



Terremoto: intensità



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE

# Terremoto: intensità



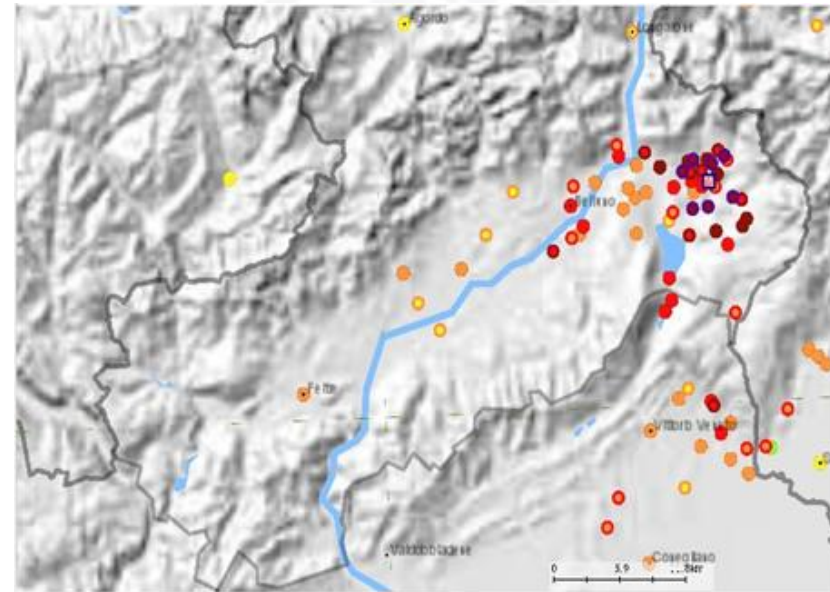
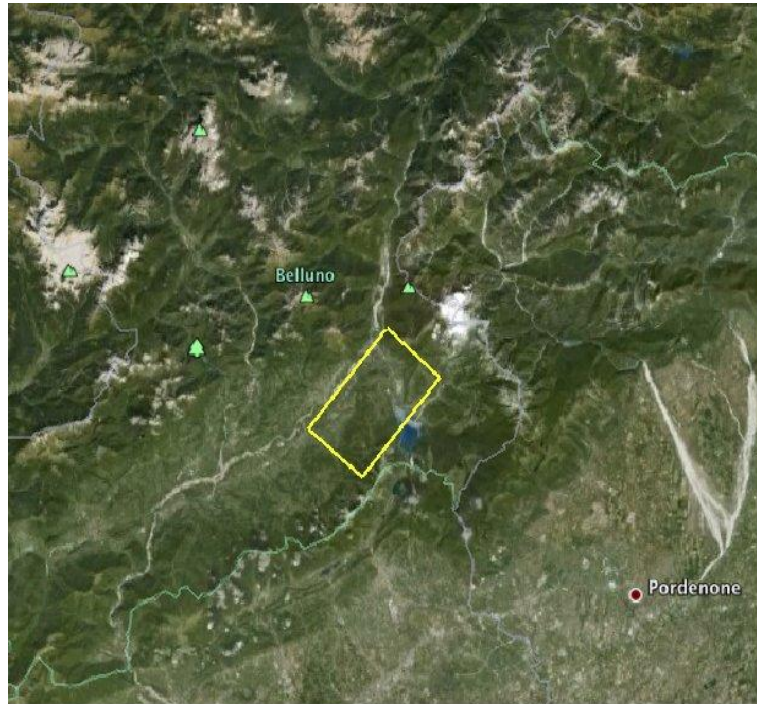
Rappresentazione artistica del terremoto di Basel 1356

Terremoto: intensità



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE

## Terremoto di Belluno del 29 giugno 1873, Mw 6.3



Terremoto: intensità



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI TRIESTE



<https://www.hsit.it/>

## Informazioni sui dati

L'INGV declina ogni responsabilità da un uso improprio delle informazioni fornite in questo sito. Si prega di prendere visione del [disclaimer](#).

Per citare il sito, gli elaborati e i dati si prega di fare riferimento a [Riproduzione e citazione](#)

**Hai sentito il terremoto? → Quali effetti hai avvertito?**

### Quali effetti hai avvertito?

\* campi obbligatori

**Data e ora del terremoto**

[23 feb 2024 10:23] Adriatico Meridionale (MARE) – ML: 4.7

**Dove ti trovavi**

L'indirizzo completo, fondamentale per la precisione dei risultati, sarà utilizzato esclusivamente per le attività di ricerca scientifica

Indirizzo completo \*

ad esempio: Via di Vigna Murata, 605, Roma

Dove ti trovavi \*

Piano \*

Numero totale dei piani dell'edificio \*

Cosa stavi facendo \*

**Hai Avvertito il Terremoto o Osservato i Suoi Effetti?**

Sì

No

Invia il questionario

# Terremoto: intensità





## **Compilazione delle schede di risentimento sismico sul proprio territorio comunale da parte del volontariato dei Gruppi comunali di Protezione Civile.**

In occasione di terremoti avvertiti sul territorio regionale, i volontari dei Gruppi Comunali di Protezione Civile sono formati alla compilazione di apposite schede di risentimento sismico predisposte in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale e l'Università di Udine.

Tale attività riveste notevole interesse ai fini di protezione civile e per le finalità di studio dei terremoti da parte degli enti di ricerca. Dal 2014 la Protezione Civile Regionale organizza, in particolare con OGS-CRS appositi corsi in cui vengono illustrate le modalità di allertamento del sistema comunale di protezione civile in caso di evento sismico, con approfondimento sui compiti affidati ai volontari di ciascun Gruppo comunale per una immediata raccolta di informazioni dal territorio sugli effetti indotti dal sisma.

La compilazione delle schede è prevista per eventi avvertiti in regione per i quali la Sala operativa regionale dirama le notifiche automatiche di evento sismico a tutti i soggetti appartenenti al Sistema regionale integrato di protezione civile (ML  $\geq$  2,5 in regione, ML  $\geq$  4,0 per epicentri fuori regione).

**La compilazione della scheda richiede una preventiva attività di ricognizione del territorio, finalizzata a raccogliere le testimonianze di un numero sufficiente di persone che lo hanno avvertito, allo scopo di poter definire i dati sintetici richiesti dalla scheda riferiti al territorio considerato (singola località o intero territorio comunale).**

La raccolta dei dati avviene unicamente attraverso la compilazione del questionario.

<https://www.protezionecivile.fvg.it/it/risentimento-sismico>





## **Compilazione delle schede di risentimento sismico sul proprio territorio comunale da parte del volontariato dei Gruppi comunali di Protezione Civile.**

Le informazioni così inviate alla SOR risultano immediatamente disponibili alla Protezione civile della regione e consentono di offrire in breve tempo (si richiede l'invio dei dati di regola entro 2 ore dall'evento) un quadro complessivo della situazione evitando difficili comunicazioni telefoniche o radio, specie nelle prime ore successive alla scossa.

Si sottolinea l'importanza di acquisire, anche le schede provenienti dai Comuni ove l'evento non sia stato avvertito o in assenza di danni rilevati, ciò allo scopo di poter individuare una prima provvisoria zonizzazione delle aree di interesse per le successive attività di ricognizione da parte dei tecnici incaricati per specifici sopralluoghi di verifica degli edifici, ad iniziare da quelli strategici e rilevanti.

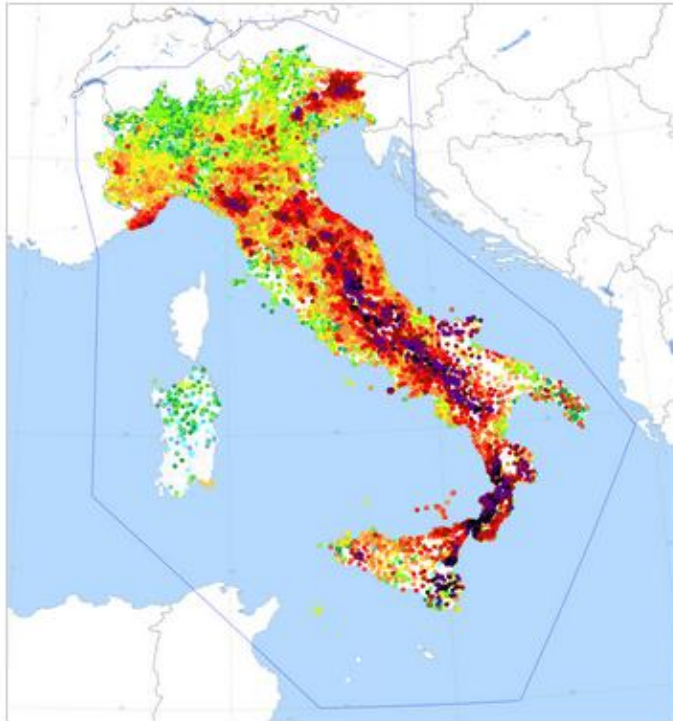
Nei casi di impossibilità a procedere entro due ore alla ricognizione e alla compilazione delle schede, queste possono utilmente essere inviate anche nelle successive 6-8 ore, come nel caso degli eventi leggeri che accadano nel corso della notte che non creano allarme nella popolazione.

Ottenere una valutazione degli effetti del terremoto è di fondamentale importanza per il sistema di Protezione Civile. Le vostre schede aiutano il sistema di Protezione Civile ad essere più preparato nel caso di una emergenza sismica.



<https://www.protezionecivile.fvg.it/it/risentimento-sismico>

## DBMI15 v4.0 Database Macrosismico Italiano



- ▶ Descrizione
- ▶ Consultazione per località
- ▶ Download  
(via ASMI web services)

Fornisce un set omogeneo di intensità macrosismiche provenienti da diverse fonti relativo ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  e d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2020.



## CPTI15 v4.0 Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani



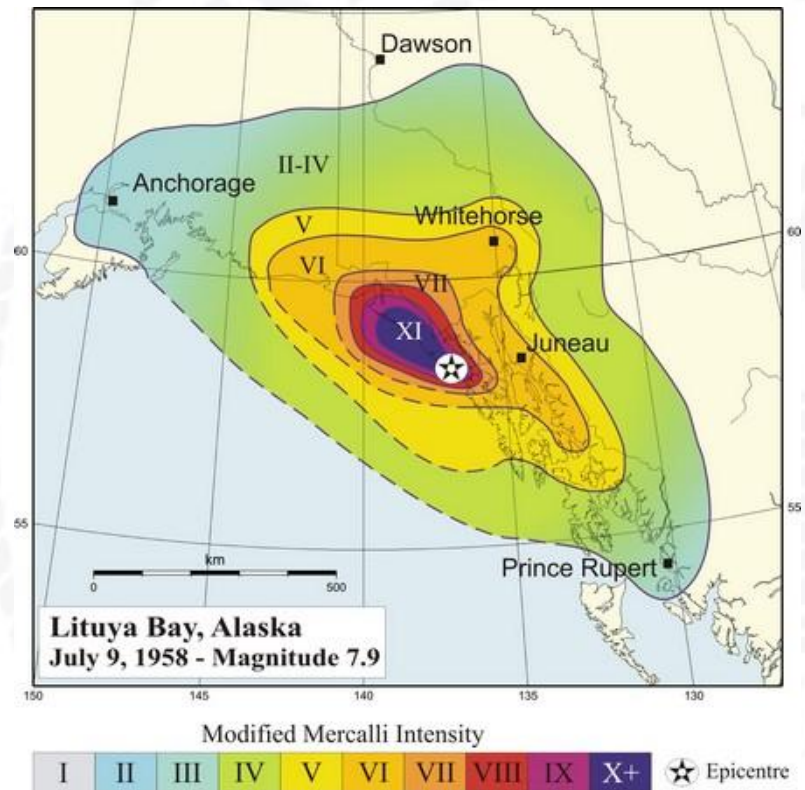
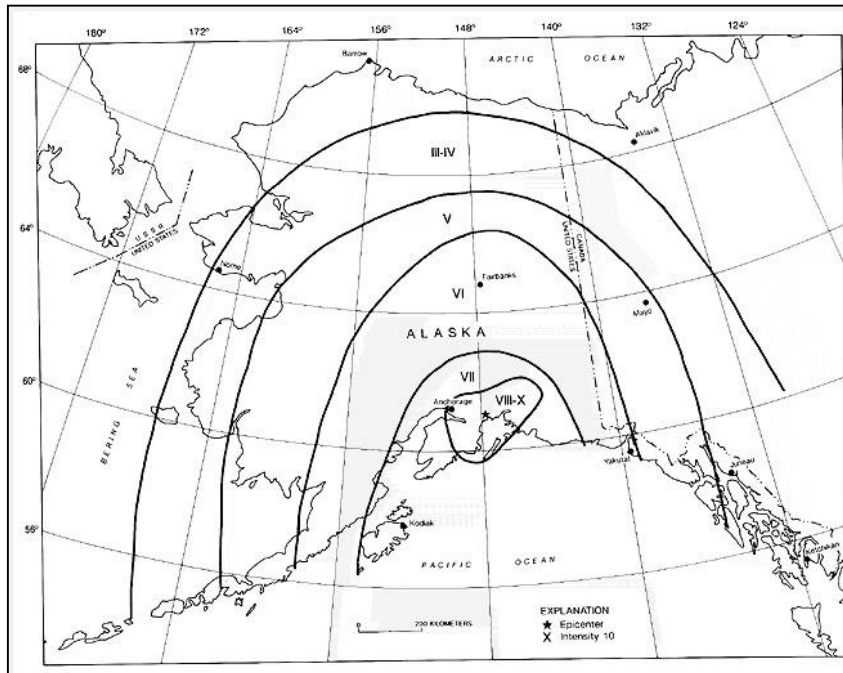
- ▶ Descrizione
- ▶ Consultazione per terremoto
- ▶ Download

Fornisce dati parametrici omogenei, sia macrosismici, sia strumentali, relativi ai terremoti con intensità massima  $\geq 5$  o magnitudo  $\geq 4.0$  d'interesse per l'Italia nella finestra temporale 1000-2020.

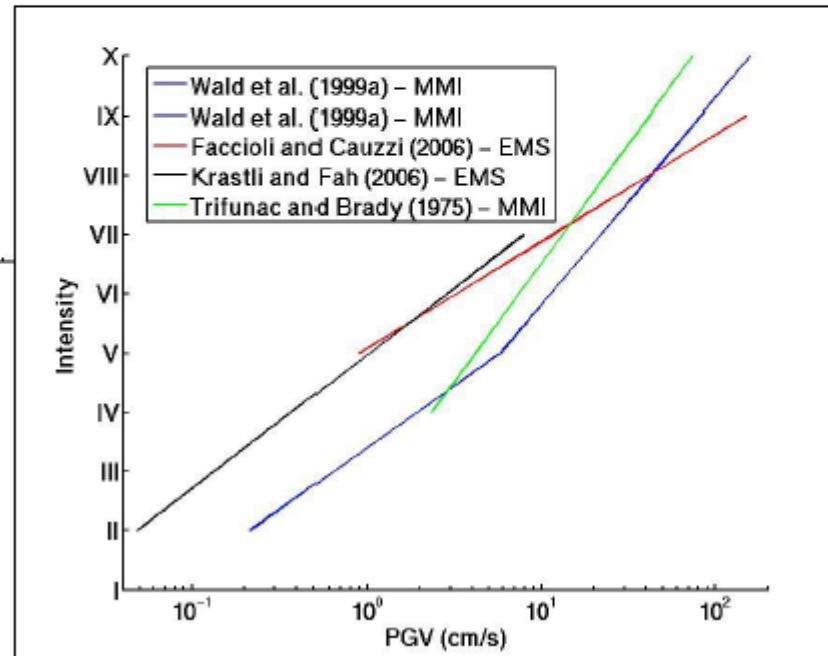
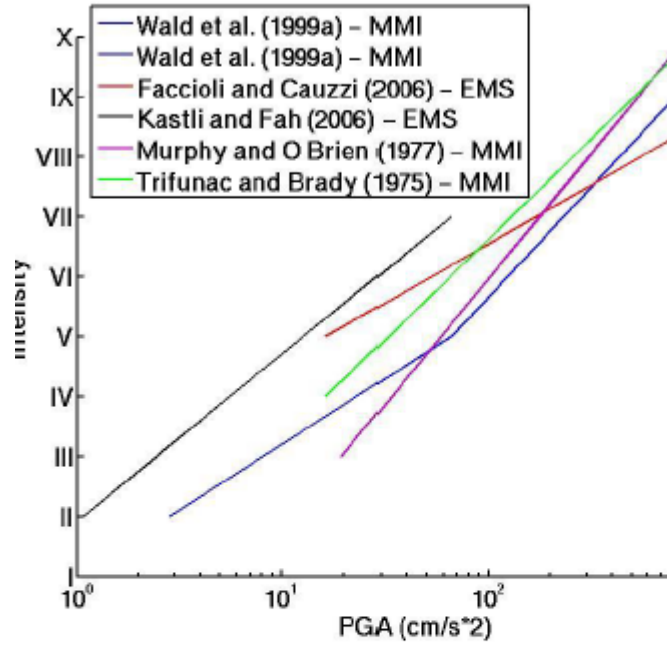


<https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>

- Per valutare la sismicità attiva di una regione si possono distribuire questionari alla popolazione, chiedendo osservazioni che possono essere utilizzate per stimare l'intensità sperimentata. I questionari vengono valutati con l'aiuto di una scala di intensità e l'intensità registrata nel luogo di ciascun osservatore viene tracciata su una mappa.
- Vengono quindi tracciate linee continue per delineare i luoghi con la stessa intensità, allo stesso modo in cui le curve di livello vengono utilizzate sulle carte topografiche per indicare l'altitudine.



## Relazioni PGA/PGV – Intensità



# Estimation of regression laws for ground motion parameters using as case of study the Amatrice earthquake.

**L. Tiberi<sup>1</sup>, G. Costa<sup>1</sup>**

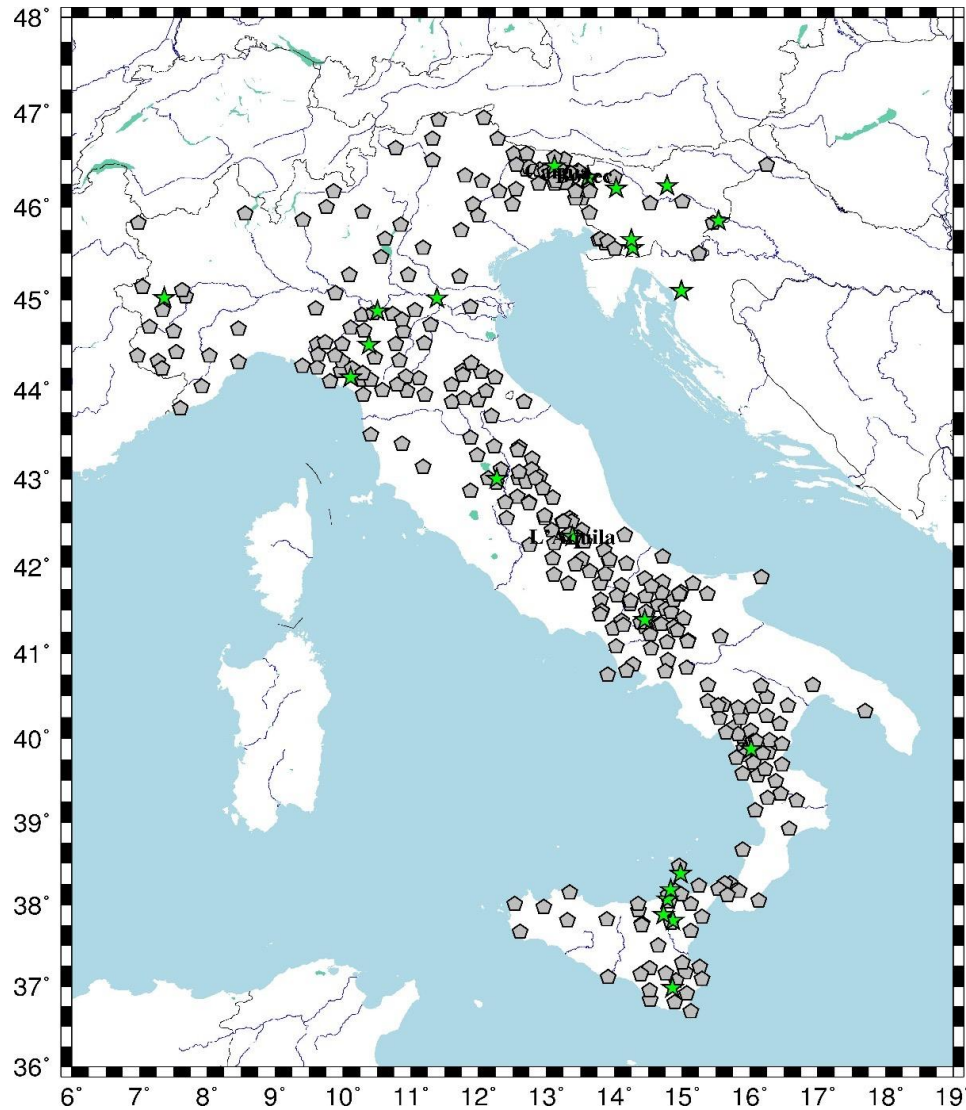
<sup>1</sup> University of Trieste, DMG, Trieste, SeisRaM group

## Introduction

The possibility to directly associate the damages to the ground motion parameters is always a great challenge, in particular for civil protections.

Even if there are few regression law estimations in literature for the Italian territory (e.g. Faccioli and Cauzzi (2007) and Faenza and Michelini (2010)), the availability of new accelerometric data allows us to estimate a new set of high quality regression laws.

# Input Data



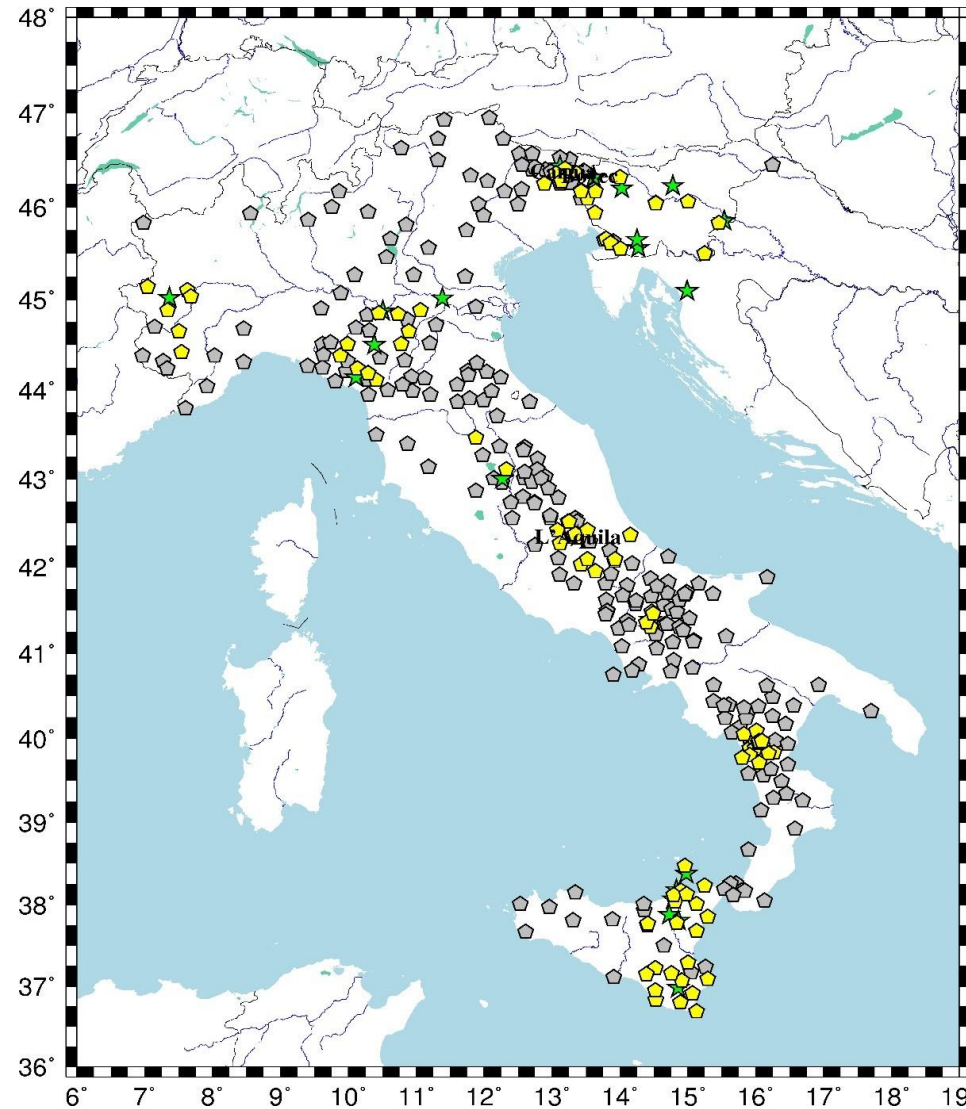
Data collected using the CE3RN (Central Eastern European Earthquake and Research Network) and the RAN (National Accelerometric Network managed by the Civil Defence of Rome) stations

ML  $\geq$  3.8

GMPs (ground motion parameters) estimated using an automatic procedure that works daily in a real time mode. (Gallo et al. (2014))

The green stars are the epicentral location of the studied events and the grey pentagons are the station sites, where we have calculated the GMPs values.

# Input Data



Data collected using the CE3RN (Central Eastern European Earthquake and Research Network) and the RAN (National Accelerometric Network managed by the Civil Defence of Rome) stations

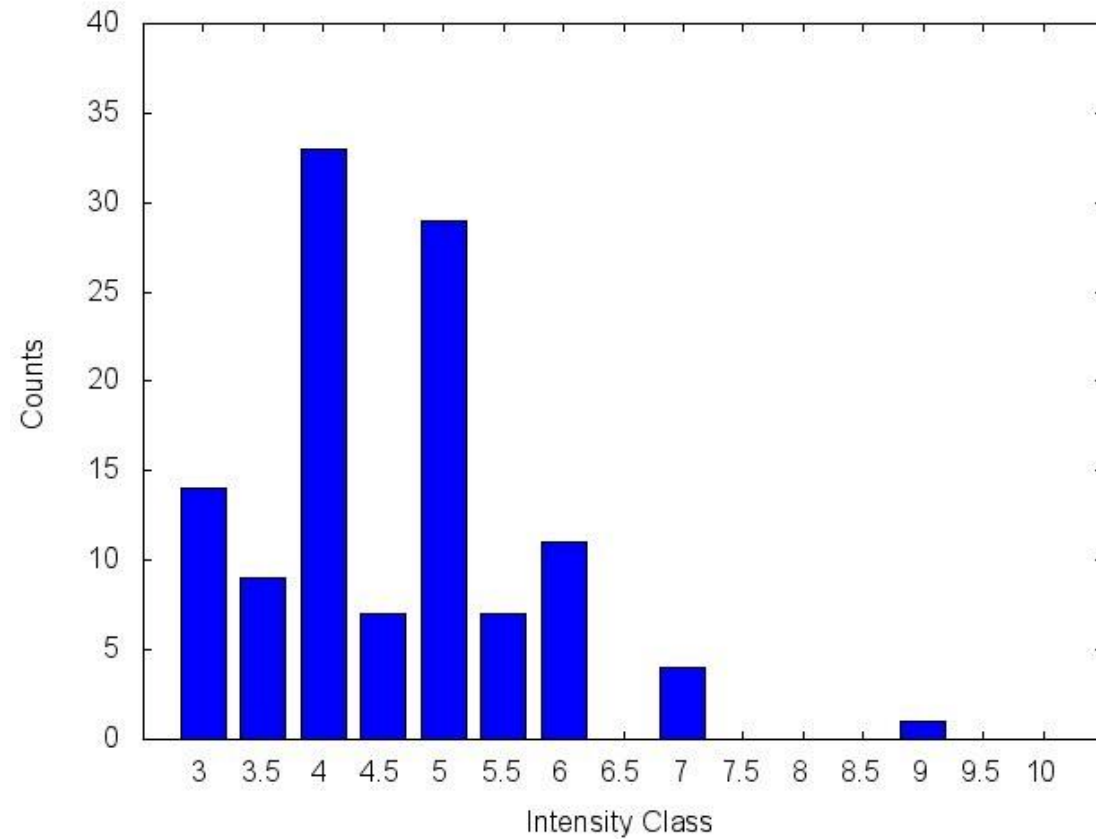
Macroseismic data collected from the ARSO macroseismic archive (for the slovenian events) and from the DBMI15 (for the italian events).

Maximum distance of 4 km, with an average value of :  
 **$(1.8 \pm 1.8)$  km**

**115 pairs of intensity - GMPs values**

Data set used for the regression law estimation. The green stars are the epicentral location of the studied events and the grey pentagons are the station sites, where we have calculated the GMPs values and the yellow one are those with an observed intensity associated.

## Input Data

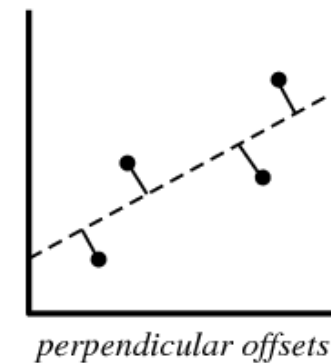
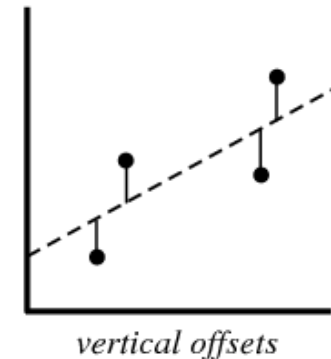


## Regression laws and used algorithms

$$I = a * \log_{10}(\text{GMP}) + b$$

**Not linear least-squares (NLLS)** (Levenberg, 1944) needs initial values for  $a$  and  $b$  (set 1.0 in this study) and the independent variable must be known with greater accuracy than the dependent one.

**Orthogonal distance regression (ODR)** (Boggs et al., 1987) estimates errors perpendicularly to the line not vertically. So it takes into account the errors of both variables. So it is possible to invert the relation.



## Results

GMPs	NLLS				ODR			
	a	b	R <sup>2</sup>	σ	a	b	R <sup>2</sup>	σ
max PGD	1.60 ± 0.17	6.27 ± 0.21	0.93	0.55	1.71 ± 0.18	6.35 ± 0.22	0.92	0.28
max PGV	1.84 ± 0.24	4.85 ± 0.23	0.89	0.66	2.03 ± 0.27	4.82 ± 0.25	0.89	0.3
max PGA	2.03 ± 0.34	2.11 ± 0.59	0.84	0.8	2.39 ± 0.39	1.55 ± 0.70	0.92	0.28
max Arias	1.07 ± 0.15	5.35 ± 0.23	0.88	0.7	1.17 ± 0.16	5.38 ± 0.25	0.88	0.46
max Housner	1.81 ± 0.23	3.82 ± 0.28	0.9	0.63	1.98 ± 0.25	3.70 ± 0.30	0.9	0.29
max PSA03	1.94 ± 0.34	1.83 ± 0.67	0.83	0.84	2.31 ± 0.41	1.19 ± 0.80	0.82	0.35
max PSA10	1.69 ± 0.22	3.36 ± 0.33	0.89	0.65	1.86 ± 0.24	3.17 ± 0.35	0.9	0.31
max PSA30	1.64 ± 0.17	4.89 ± 0.19	0.92	0.54	1.76 ± 0.18	4.87 ± 0.19	0.93	0.27

a, b and R<sup>2</sup> values are consistent between the two different algorithms.

The main differences are the standard deviations lower using ODR than the NLLS.

## Test on input data

How much are the data close to the regression line, so how much does the line represent well the data used?

$$diff = \sum_{i=1}^N (I_{OBS}^i - I_{CALC}^i) / N$$

$$misfit = \sum_{i=1}^N (|I_{OBS}^i - I_{CALC}^i|) / N$$

	NLLS		ODR	
	Diff	Misfit	Diff	Misfit
<b>PGD</b>	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5
<b>PGV</b>	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5
<b>PGA</b>	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5
<b>Arias</b>	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5
<b>Housner</b>	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5
<b>PSA03</b>	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5
<b>PSA10</b>	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5	0.0 ± 0.5	0.5 ± 0.5
<b>PSA30</b>	0.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5	0.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5

Test using the data set of estimation of the laws.

# Comparisons: PGV relations

$$I_{MCS} = (1.84 \pm 0.24) * \log PGV + (4.85 \pm 0.23) , \sigma = 0.66, R^2 = 0.89$$

NLLS

$$I_{MCS} = (2.03 \pm 0.27) * \log PGV + (4.82 \pm 0.25) , \sigma = 0.30, R^2 = 0.89$$

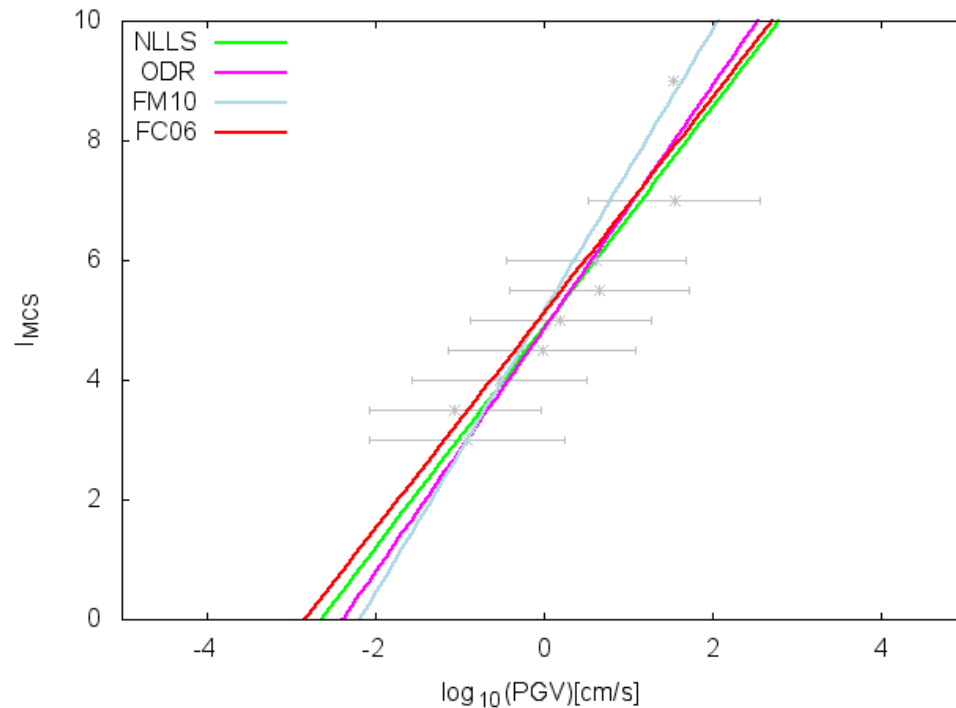
ODR

$$I_{MCS} = (2.35 \pm 0.09) * \log PGV + (5.11 \pm 0.07) , \sigma = 0.26$$

Faenza and Michelini (2010)

$$I_{MCS} = (1.80 \pm 0.17) * \log PGV + (5.09 \pm 0.22) , \sigma = 0.71, R^2 = 0.61$$

Faccioli and Cauzzi (2006)



# Comparisons: PGA relations

$$I_{MCS} = (2.03 \pm 0.34) * \log \text{PGA} + (2.11 \pm 0.59), \sigma = 0.80, R^2 = 0.84$$

NLLS

$$I_{MCS} = (2.39 \pm 0.39) * \log \text{PGA} + (1.55 \pm 0.70), \sigma = 0.28, R^2 = 0.92$$

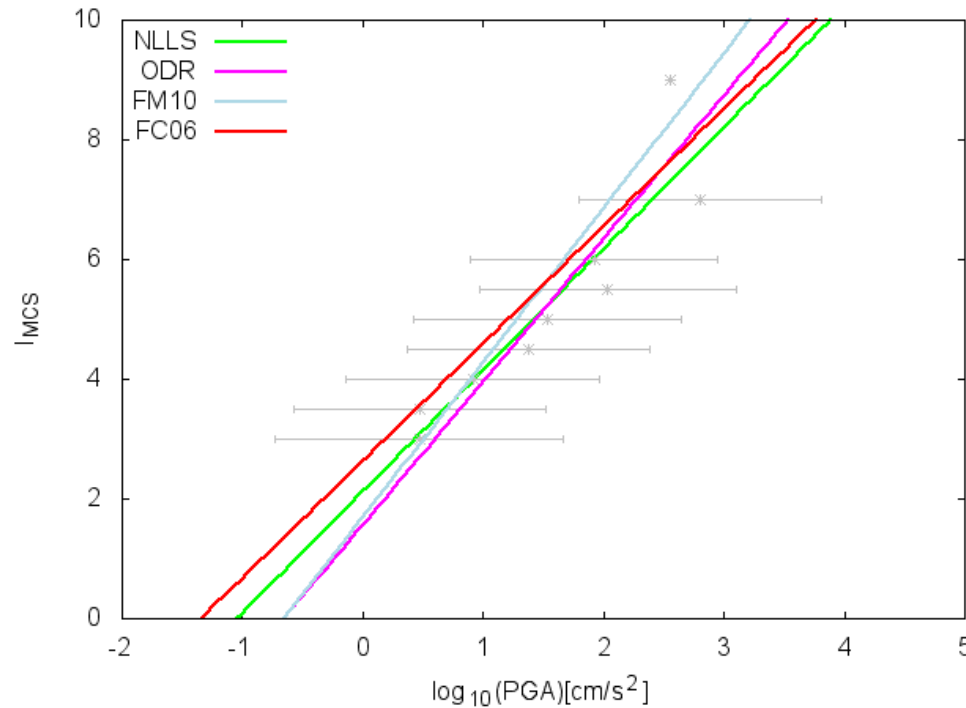
ODR

$$I_{MCS} = (2.58 \pm 0.14) * \log \text{PGA} + (1.68 \pm 0.22), \sigma = 0.35$$

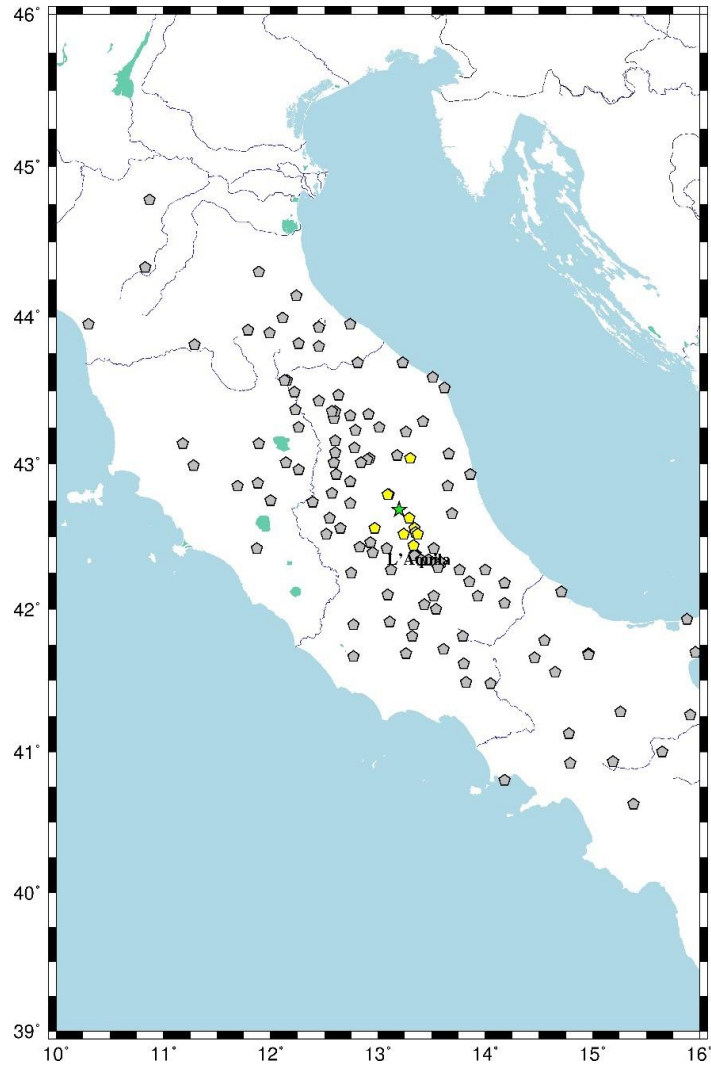
Faenza and Michelini (2010)

$$I_{MCS} = (1.96 \pm 0.29) * \log \text{PGA} + (2.62 \pm 0.10), \sigma = 0.89, R^2 = 0.38$$

Faccioli and Cauzzi (2006)



# Amatrice earthquake



Amatrice earthquake occurred the 24<sup>th</sup> August of 2016, 01:36 UTC with a Mw of 6.1.

Data collected using the RAN (National Accelerometric Network managed by the Civil Defence of Rome) stations.

Macroseismic data collected from Albini et al. (2016).

The green star is the epicentral location of Amatrice event and the grey pentagons are the station sites, where we have calculated the GMPs values, and the yellow one are those with an observed intensity associated.

## Test using Amatrice earthquake data

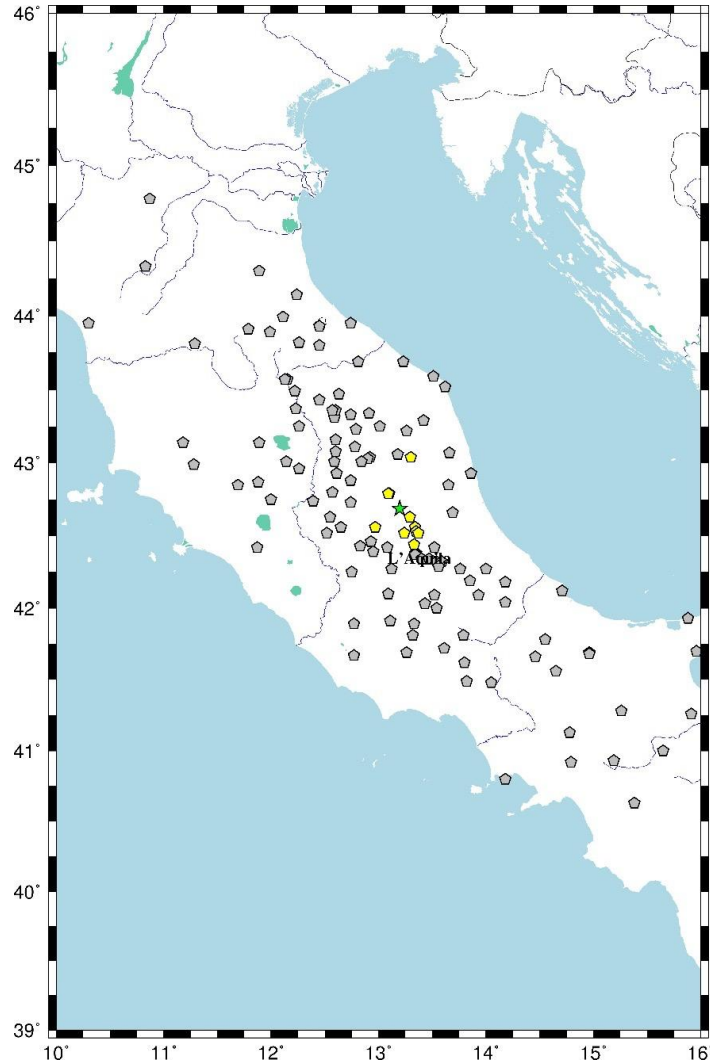
$$diff = \sum_{i=1}^N (I_{OBS}^i - I_{CALC}^i) / N$$

$$misfit = \sum_{i=1}^N (|I_{OBS}^i - I_{CALC}^i|) / N$$

	NLLS		ODR	
	Average diff	Misfit	Average diff	Misfit
PGD	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5	-1.5 ± 0.5	1.5 ± 0.5
PGV	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5
PGA	-0.5 ± 0.5	1.0 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5
PSA03	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5
PSA10	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5
PSA30	-1.5 ± 0.5	2.0 ± 0.5	-1.5 ± 0.5	2.0 ± 0.5
Arias	-0.5 ± 0.5	1.0 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5
Housner	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5

	PGV		PGA	
	Diff	Misfit	Diff	Misfit
NLLS	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5	-0.5 ± 0.5	1.0 ± 0.5
ODR	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	1.0 ± 0.5
FC06	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5	-1.0 ± 0.5	1.5 ± 0.5
FM10	-2.0 ± 0.5	2.0 ± 0.5	-1.5 ± 0.5	1.5 ± 0.5

## Adding Amatrice earthquake to the initial dataset



Amatrice earthquake occurred the 24<sup>th</sup> August of 2016, 01:36 UTC with a Mw of 6.1.

Data collected using the RAN (National Accelerometric Network managed by the Civil Defence of Rome) stations.

Maximum distance of 4 km, with an average value of :

**$(1.8 \pm 1.8)$  km**

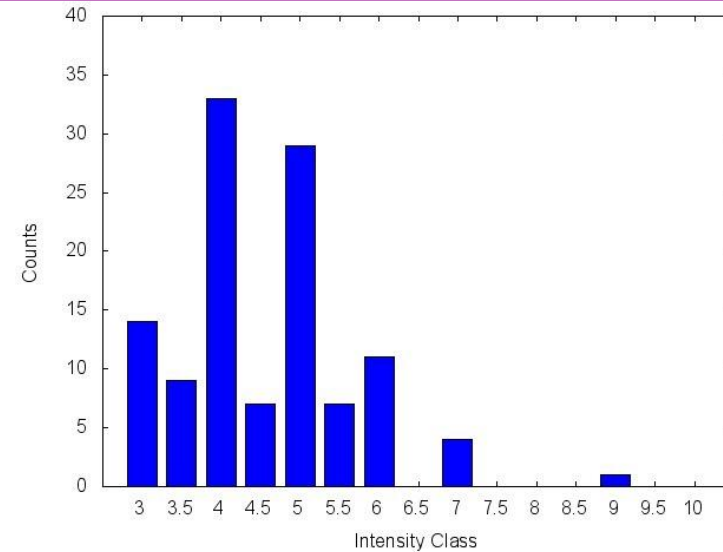
**125 pairs of intensity - GMPs values**

The green stars are the epicentral location of the studied events and the grey pentagons are the station sites, where we have calculated the GMPs values, and the yellow one are those with an observed intensity associated.

## Original dataset

**Average distance of :  
(1.8 ± 1.8) km**

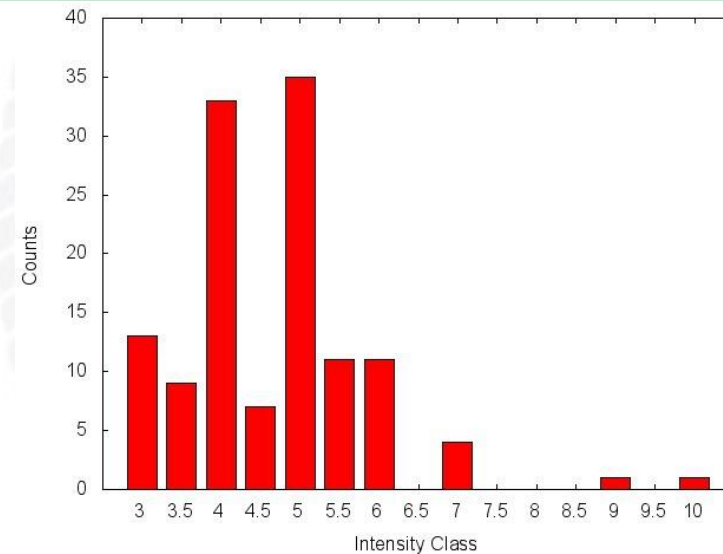
**115 pairs of intensity - GMPs values**



## Original dataset + Amatrice data

**Average distance of :  
(1.8 ± 1.8) km**

**125 pairs of intensity - GMPs values**



## Regression laws including Amatrice:

### without Amatrice

GMPs	NLLS				ODR			
	a	b	R <sup>2</sup>	σ	a	b	R <sup>2</sup>	σ
max PGD	1.60 ± 0.17	6.27 ± 0.21	0.93	0.55	1.71 ± 0.18	6.35 ± 0.22	0.92	0.28
max PGV	1.84 ± 0.24	4.85 ± 0.23	0.89	0.66	2.03 ± 0.27	4.82 ± 0.25	0.89	0.3
max PGA	2.03 ± 0.34	2.11 ± 0.59	0.84	0.8	2.39 ± 0.39	1.55 ± 0.70	0.92	0.28
max Arias	1.07 ± 0.15	5.35 ± 0.23	0.88	0.7	1.17 ± 0.16	5.38 ± 0.25	0.88	0.46
max Housner	1.81 ± 0.23	3.82 ± 0.28	0.9	0.63	1.98 ± 0.25	3.70 ± 0.30	0.9	0.29
max PSA03	1.94 ± 0.34	1.83 ± 0.67	0.83	0.84	2.31 ± 0.41	1.19 ± 0.80	0.82	0.35
max PSA10	1.69 ± 0.22	3.36 ± 0.33	0.89	0.65	1.86 ± 0.24	3.17 ± 0.35	0.9	0.31
max PSA30	1.64 ± 0.17	4.89 ± 0.19	0.92	0.54	1.76 ± 0.18	4.87 ± 0.19	0.93	0.27

### with Amatrice

GMPs	NLLS				ODR			
	a	b	R <sup>2</sup>	σ	a	b	R <sup>2</sup>	σ
max PGD	1.82 ± 0.27	6.53 ± 0.32	0.85	0.94	2.13 ± 0.31	6.64 ± 0.34	0.85	0.41
max PGV	2.12 ± 0.32	4.89 ± 0.33	0.85	0.96	2.46 ± 0.37	4.76 ± 0.37	0.85	0.37
max PGA	2.33 ± 0.35	1.77 ± 0.68	0.84	0.97	2.75 ± 0.42	1.03 ± 0.82	0.84	0.34
max Arias	1.23 ± 0.19	5.53 ± 0.31	0.84	0.98	1.41 ± 0.22	5.49 ± 0.34	0.84	0.58
max Housner	2.07 ± 0.32	3.75 ± 0.44	0.84	0.97	2.44 ± 0.37	3.39 ± 0.51	0.84	0.39
max PSA03	2.22 ± 0.35	1.46 ± 0.74	0.84	0.99	2.61 ± 0.41	0.72 ± 0.87	0.84	0.37
max PSA10	1.96 ± 0.29	3.18 ± 0.49	0.85	0.96	2.29 ± 0.34	2.72 ± 0.57	0.85	0.4
max PSA30	1.87 ± 0.27	4.92 ± 0.32	0.85	0.94	2.18 ± 0.31	4.78 ± 0.36	0.85	0.39

The quality of the regression laws decreases including Amatrice data, probably due to the near fault effects in some points.

## Regression laws including Amatrice:

GMPs	without Amatrice				without Amatrice			
	NLLS		ODR		NLLS		ODR	
	a	b	R <sup>2</sup>	σ	a	b	R <sup>2</sup>	σ
max PGD	1.60 ± 0.17	6.27 ± 0.21	0.93	0.55	1.71 ± 0.18	6.35 ± 0.22	0.92	0.28
max PGV	1.84 ± 0.24	4.85 ± 0.23	0.89	0.66	2.03 ± 0.27	4.82 ± 0.25	0.89	0.3
max PGA	2.03 ± 0.34	2.11 ± 0.59	0.84	0.8	2.39 ± 0.39	1.55 ± 0.70	0.92	0.28
max Arias	1.07 ± 0.15	5.35 ± 0.23	0.88	0.7	1.17 ± 0.16	5.38 ± 0.25	0.88	0.46
max Housner	1.81 ± 0.23	3.82 ± 0.28	0.9	0.63	1.98 ± 0.25	3.70 ± 0.30	0.9	0.29
max PSA03	1.94 ± 0.34	1.83 ± 0.67	0.83	0.84	2.31 ± 0.41	1.19 ± 0.80	0.82	0.35
max PSA10	1.69 ± 0.22	3.36 ± 0.33	0.89	0.65	1.86 ± 0.24	3.17 ± 0.35	0.9	0.31
max PSA30	1.64 ± 0.17	4.89 ± 0.19	0.92	0.54	1.76 ± 0.18	4.87 ± 0.19	0.93	0.27

GMPs	with Amatrice no AMT				with Amatrice no AMT			
	NLLS		ODR		NLLS		ODR	
	a	b	R <sup>2</sup>	σ	a	b	R <sup>2</sup>	σ
max PGD	1.56 ± 0.19	6.17 ± 0.23	0.91	0.58	1.71 ± 0.21	6.26 ± 0.24	0.91	0.31
max PGV	1.81 ± 0.26	4.79 ± 0.25	0.87	0.67	2.04 ± 0.29	4.74 ± 0.28	0.87	0.33
max PGA	2.00 ± 0.34	2.12 ± 0.60	0.83	0.77	2.38 ± 0.41	1.53 ± 0.73	0.83	0.34
max Arias	1.05 ± 0.16	5.33 ± 0.24	0.87	0.68	1.16 ± 0.17	5.34 ± 0.26	0.87	0.48
max Housner	1.77 ± 0.24	3.79 ± 0.31	0.88	0.64	1.98 ± 0.27	3.63 ± 0.34	0.88	0.31
max PSA03	1.91 ± 0.35	1.87 ± 0.68	0.82	0.81	2.28 ± 0.41	1.21 ± 0.82	0.81	0.37
max PSA10	1.67 ± 0.23	3.31 ± 0.35	0.88	0.64	1.87 ± 0.25	3.07 ± 0.39	0.88	0.33
max PSA30	1.61 ± 0.19	4.79 ± 0.22	0.91	0.58	1.77 ± 0.21	4.74 ± 0.23	0.9	0.3

Without considering the AMT data, above the fault, the regression laws quality increased. These parameters are not significant for the near-fault intensity estimation.

## To conclude

We estimated a set of regression laws between Intensity and 8 different ground motion parameters. Using two different algorithms the results are basically coincident.

We used the Amatrice earthquake as test and we found a great correspondence between the observed and the calculated intensities, even if the number of the data is not statistically significant but better than the regression laws found in literature.

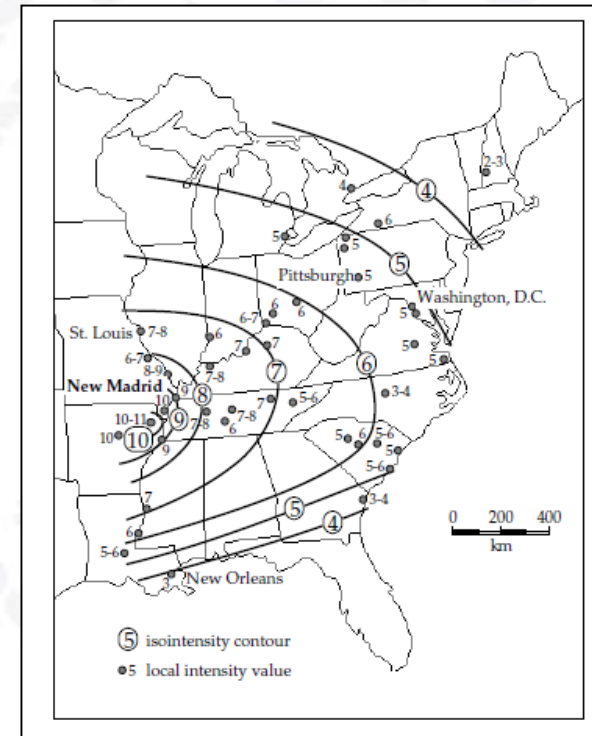
Using the Amatrice data in the estimation of the regression laws, the quality of the laws slightly decreases. This is probably due to the near fault effects. The used ground motion parameters seem not be significant in near fault. We will try to express the damages with a multi-component and multi-parametric relation.

- Il confronto delle mappe isosismiche con le mappe geologiche aiuta a spiegare la risposta del terreno alla scossa di un terremoto. Si tratta di informazioni preziose per comprendere il rischio sismico. Le fondamenta su cui vengono erette le strutture giocano un ruolo fondamentale nella loro sopravvivenza a un terremoto. Ad esempio, i sedimenti morbidi possono amplificare il movimento del terreno, aumentando i danni causati. Ciò è ancora più grave quando i sedimenti hanno un elevato contenuto d'acqua, nel qual caso può verificarsi la liquefazione dei sedimenti stessi, privando le strutture costruite su di essi del supporto e favorendone il crollo.



- I dati di intensità svolgono un ruolo importante nel determinare la sismicità storica di una regione. Un terremoto ha conseguenze drammatiche per una popolazione; questo era particolarmente vero nel passato storico, quando i rischi reali erano aumentati dalla superstizione.
- La data (e persino l'ora) del verificarsi di forti terremoti e le osservazioni dei loro effetti locali sono state registrate per secoli in documenti ecclesiastici e civili. Da tali registrazioni è talvolta possibile estrarre informazioni sufficienti per stimare l'intensità di un terremoto.
- Se la densità di popolazione è sufficientemente alta, può essere possibile costruire una mappa isosismica dalla quale si può individuare approssimativamente l'epicentro della scossa.

Un esempio interessante di questo tipo di analisi è lo studio dei terremoti di New Madrid del 1811-1812, che causarono devastazioni nella valle del Mississippi e furono avvertiti fino alle coste dell'Atlantico e del Golfo del Messico. Probabilmente ci furono tre grandi terremoti, ma gli eventi si verificarono prima dell'invenzione del sismografo, per cui i dettagli dell'accaduto dipendono dai resoconti soggettivi degli osservatori. I documenti storici dell'epoca consentono di sviluppare una mappa dell'intensità per l'area colonizzata a est del Mississippi, ma la popolazione pionieristica a ovest del fiume era all'epoca troppo scarsa per lasciare documenti adeguati per l'interpretazione dell'intensità. Sulla base delle prove disponibili, si stima che questi terremoti abbiano avuto magnitudo di 7,8-8,1.



# Effetti di sito




## EFFETTI LOCALI INDOTTI DA UN EVENTO SISMICO



Emilia  
20 maggio 2012 ore 04:03  
M=5.9

# Effetti di sito

How will 3 buildings, engineered equally, on different bedrock react to an earthquake?



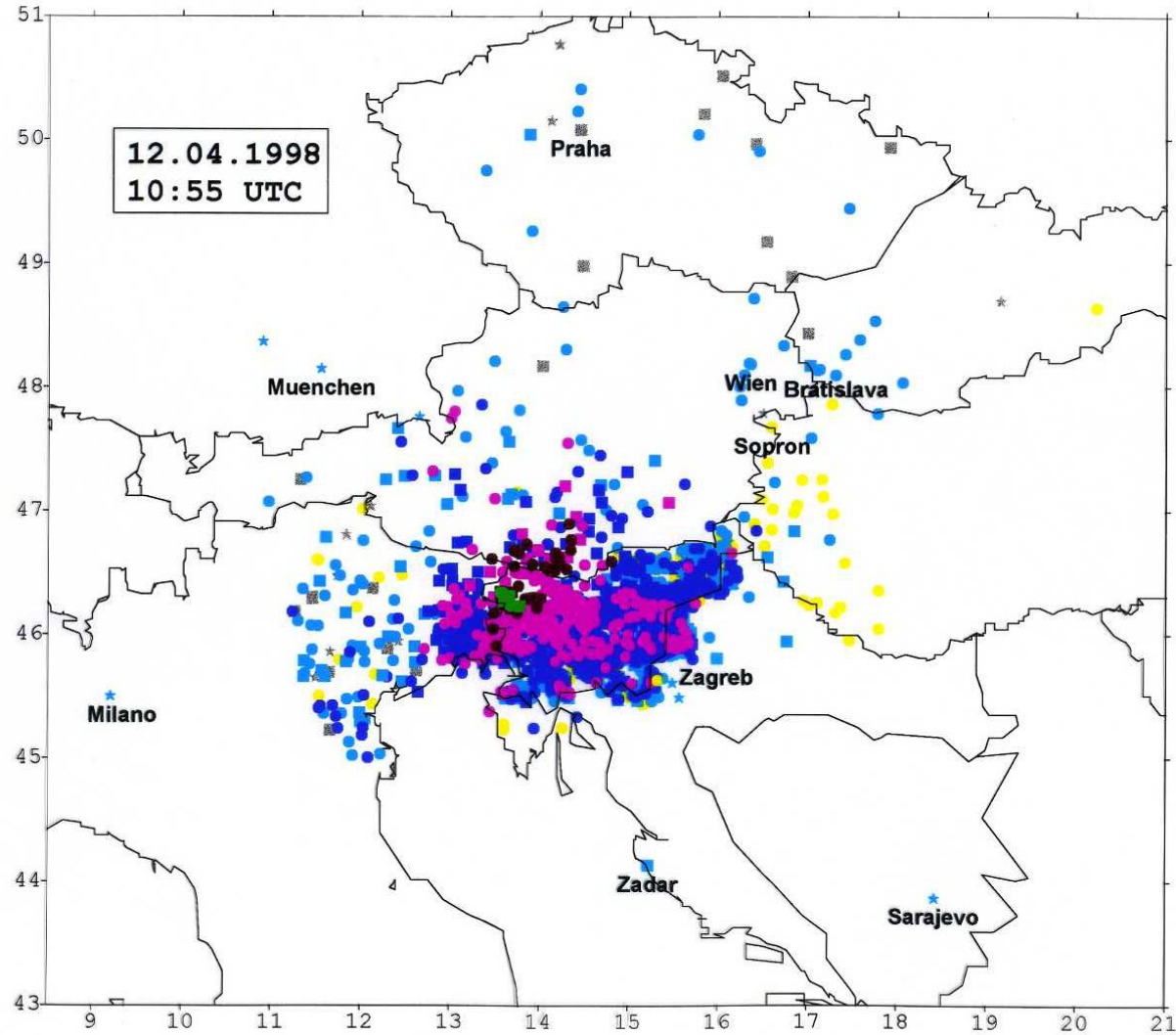
Building motion is exaggerated to emphasize wave arrivals

IRIS

Two variables affect damage during earthquake:

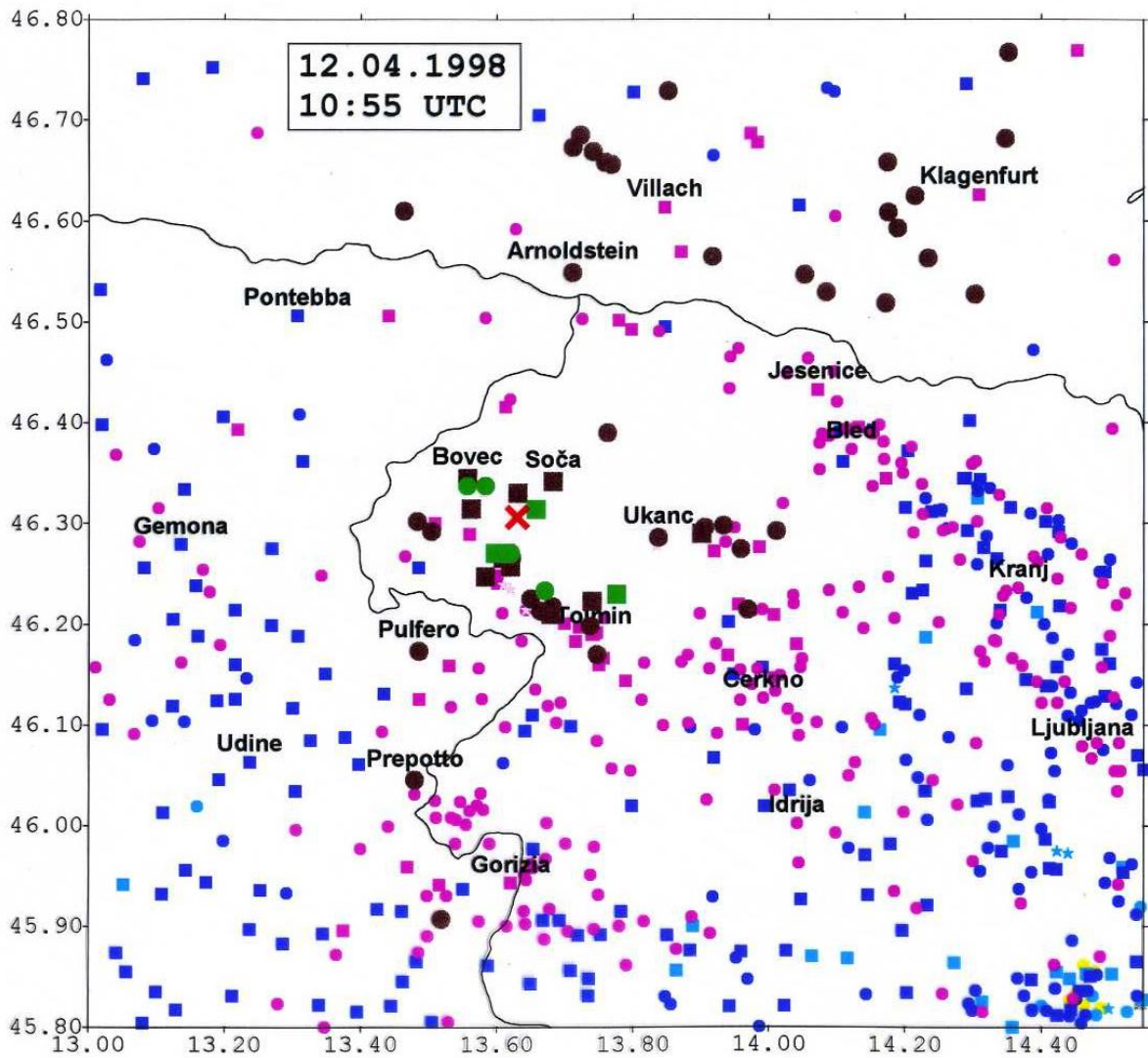
- 1) Intensity of shaking (*felt motion, not magnitude*)
- 2) Engineering

# INTENSITIES OF THE MAIN SHOCK



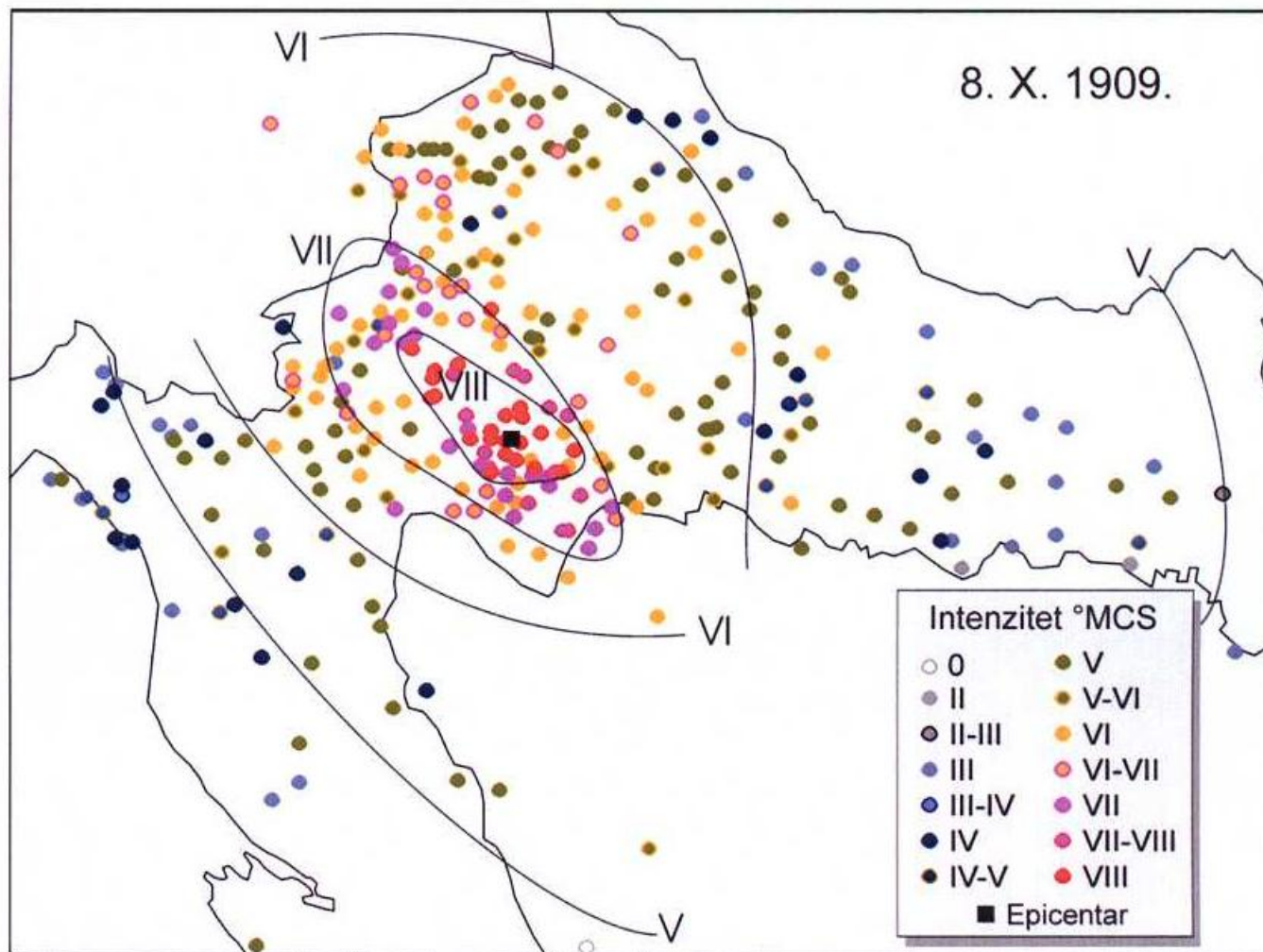
BOVEC-KRN  
1998





TERREMOTO DI  
BOVEC-KRNJ  
(SLOVENIA)  
1998

- ✗ epicentre
- VII-VIII EMS-98
- VII
- VI-VII
- VI
- ★ damage
- V-VI
- V
- IV-V
- IV
- III-IV
- III
- II-III
- ★ sound
- ★ felt
- not felt



Tracciamento delle isosisme

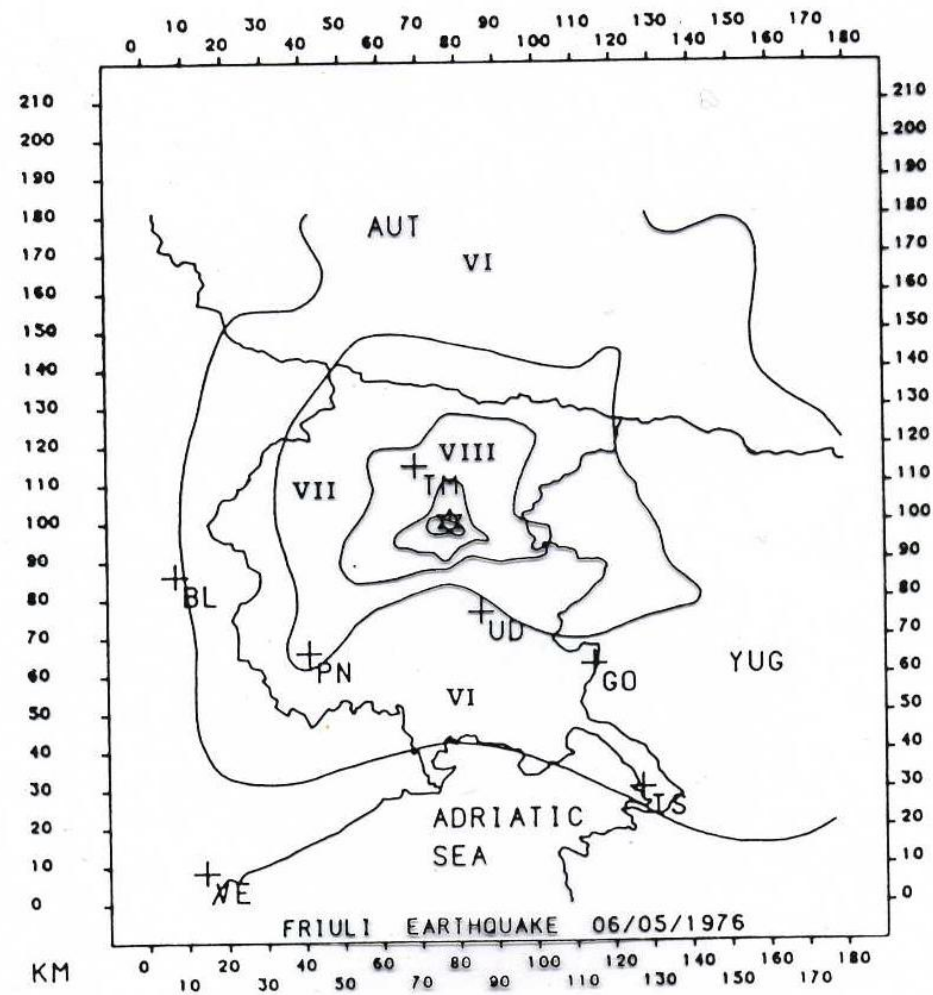


Figure 10. Observed isoseismals of the May 6, 1976 Friuli earthquake, MSK scale (after Giorgetti, 1976).

# Terremoto: magnitudo

- La magnitudo è una misura determinata sperimentalmente della "dimensione" di un terremoto. Nel 1935 C. F. Richter tentò di classificare le dimensioni dei terremoti locali nella California meridionale sulla base dell'ampiezza delle vibrazioni del suolo prodotte a una distanza nota dall'epicentro. Le vibrazioni venivano registrate dai sismografi, che erano standardizzati per avere la stessa risposta a un determinato stimolo.
- La definizione originale di magnitudo di Richter si basava sulle ampiezze delle onde di superficie ( $A_s$ ) registrate dai sismografi a una distanza epicentrale di 100 km.
- Poiché i sismografi erano situati a varie distanze dal terremoto, è stato aggiunto un termine supplementare per compensare l'attenuazione del segnale all'aumentare della distanza epicentrale.

# Magnitudo

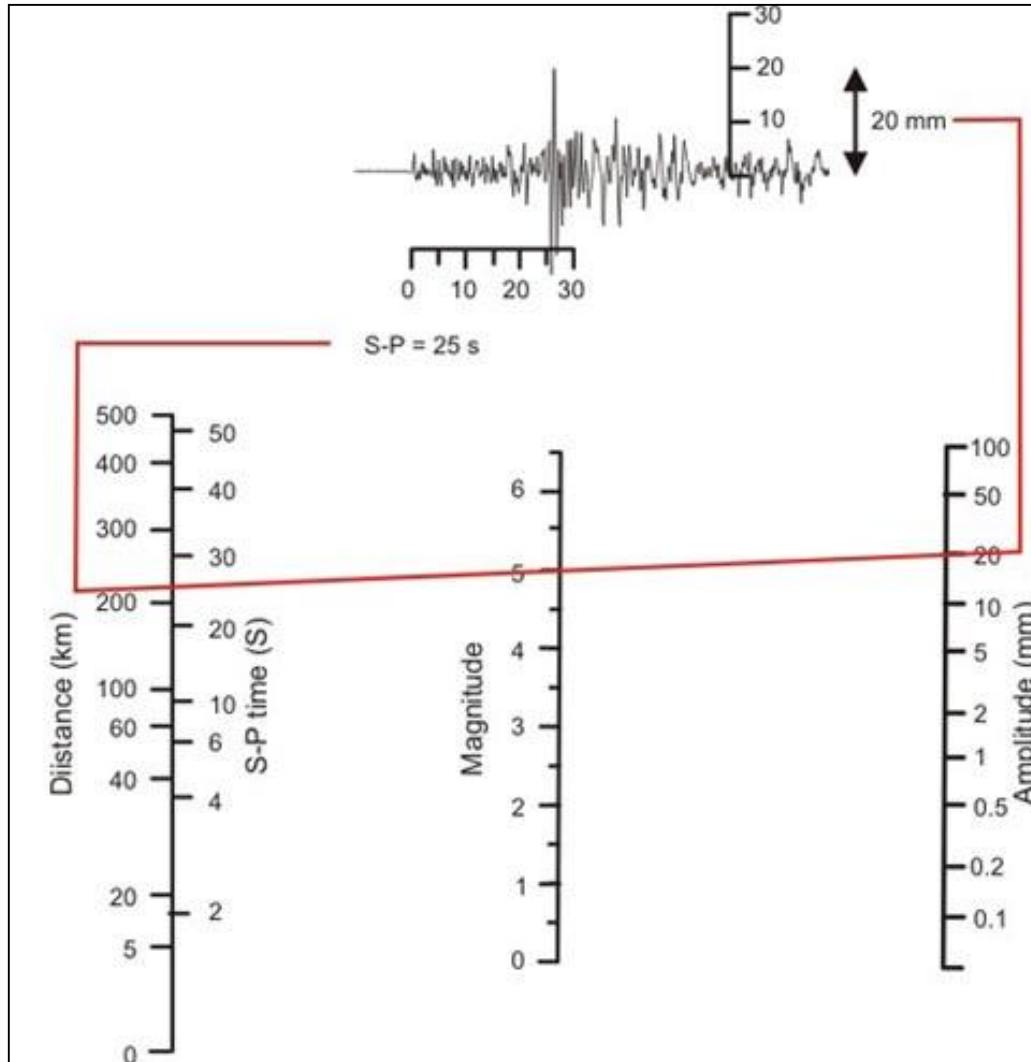
La **magnitudo**, più propriamente, è un parametro atto a rappresentare l'energia sprigionata da un terremoto. Viene calcolata sulla base di misure effettuate sul sismogramma, maggiore è l'energia liberata dal sisma maggiori sono le ampiezze delle oscillazioni registrate. Misurata per molti anni (simbolo M) tramite la Scala Richter, oggi esistono diverse scale di magnitudo. Tutte le scale, a differenza della Scala Mercalli, non sono decimali ma *logaritmiche* perciò la differenza di un'unità implica un potenziale energetico di circa *30 volte maggiore o minore*.

$$M = \log A / A_0 + \varepsilon$$

**A** = ampiezza massima delle oscillazioni del terremoto che si sta osservando

**A<sub>0</sub>** = ampiezza massima delle oscillazioni causate da un terremoto di riferimento

**ε** = fattore di correzione (distanza reale dall'epicentro, profondità dell'ipocentro)



$$M_L = \log_{10}(A) - \log_{10}(\Delta) \quad [Eq\ 3]$$

Forma generale della Magnitudo:

$$M = \log(A/T) + F(h, \Delta) + C$$

**A** = ampiezza del segnale

**T** = Periodo dominante

**F** = correzione per la variazione dell'ampiezza in funzione della profondità e distanza dell'evento dal sismometro

**C** = fattore regionale di scala

$$M_s = \log_{10}\left(\frac{A_s}{T}\right) + 1.66 \log_{10}(\Delta) + 3.3 \quad [Eq 4]$$

$$m_b = \log_{10}\left(\frac{A_p}{T}\right) + Q(\Delta, h) \quad [Eq 5]$$

$A_s$  = ampiezza del segnale, fase onde superficiali

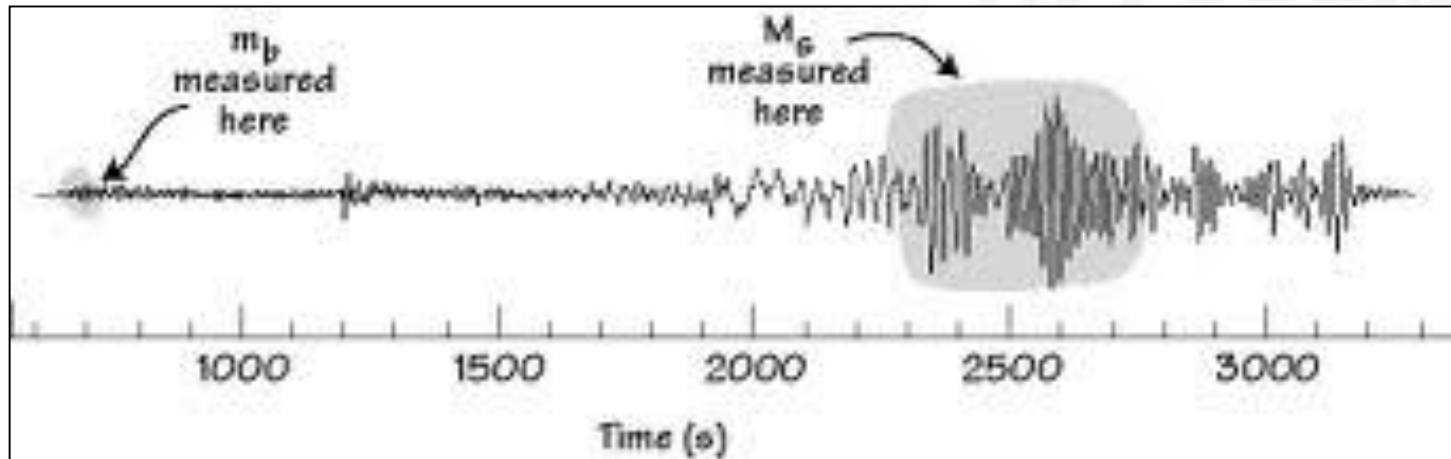
$A_p$  = ampiezza del segnale, fase P

$T$  = Periodo dominante

$\Delta$  = distanza

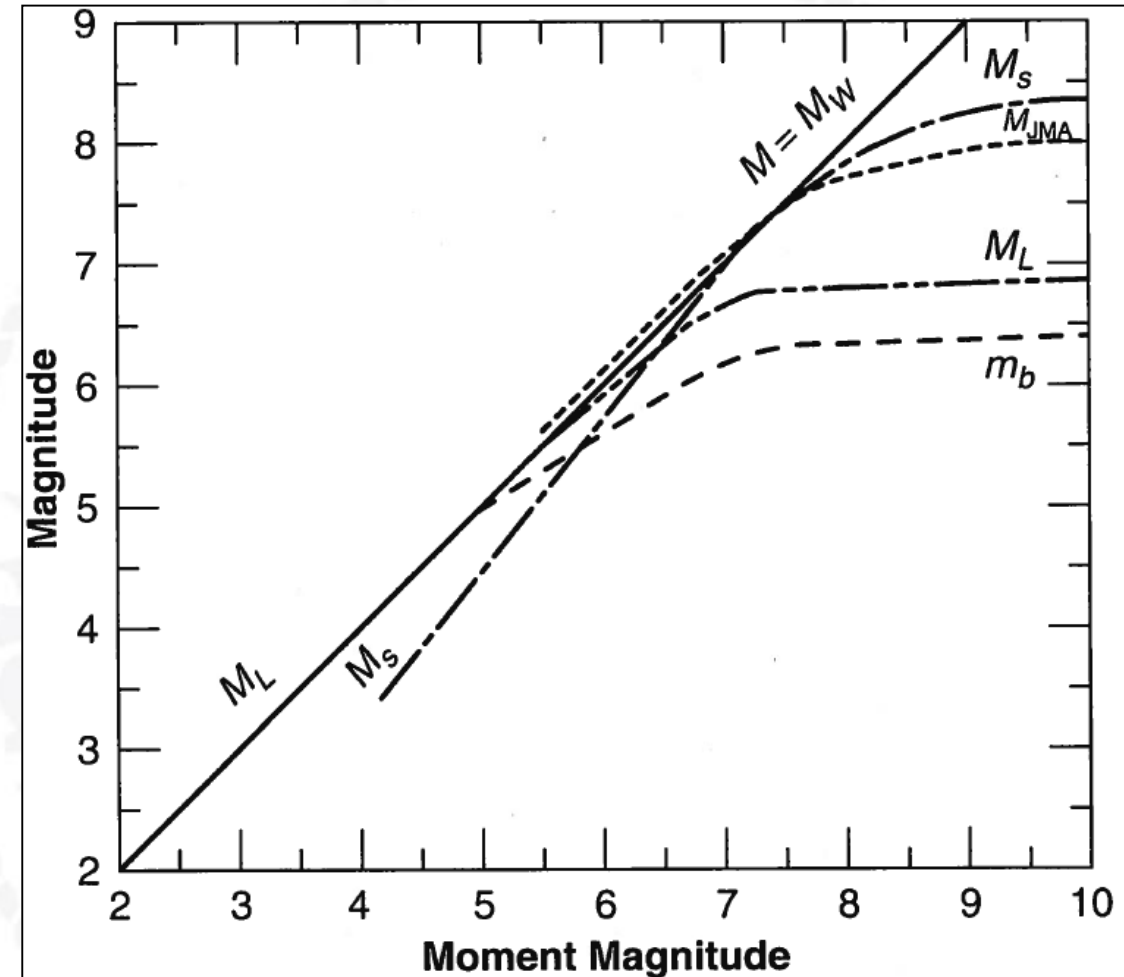
$H$  = profondità

$Q(\Delta, h)$  = correzione per la variazione dell'ampiezza in funzione della profondità e distanza dell'evento dal sismometro



# Terremoto: saturazione della magnitudo

- Al di sopra di una certa dimensione, ogni metodo diventa insensibile alle dimensioni del terremoto e presenta una saturazione della magnitudo. Ciò si verifica per le stime delle onde di corpo intorno a  $m_b > 6$ ; tutti i terremoti più grandi danno la stessa magnitudo delle onde di corpo. Allo stesso modo, le stime di magnitudo delle onde di superficie si saturano a  $M_s > 8$ .
- Quindi, per terremoti molto grandi,  $M_s$  e  $m_b$  sottostimano l'energia rilasciata. Una definizione alternativa di magnitudo, basata sullo spettro a lungo periodo ( $M_w$ ) dell'onda sismica, è preferito per i terremoti molto grandi. Sfrutta le dimensioni fisiche della sorgente.

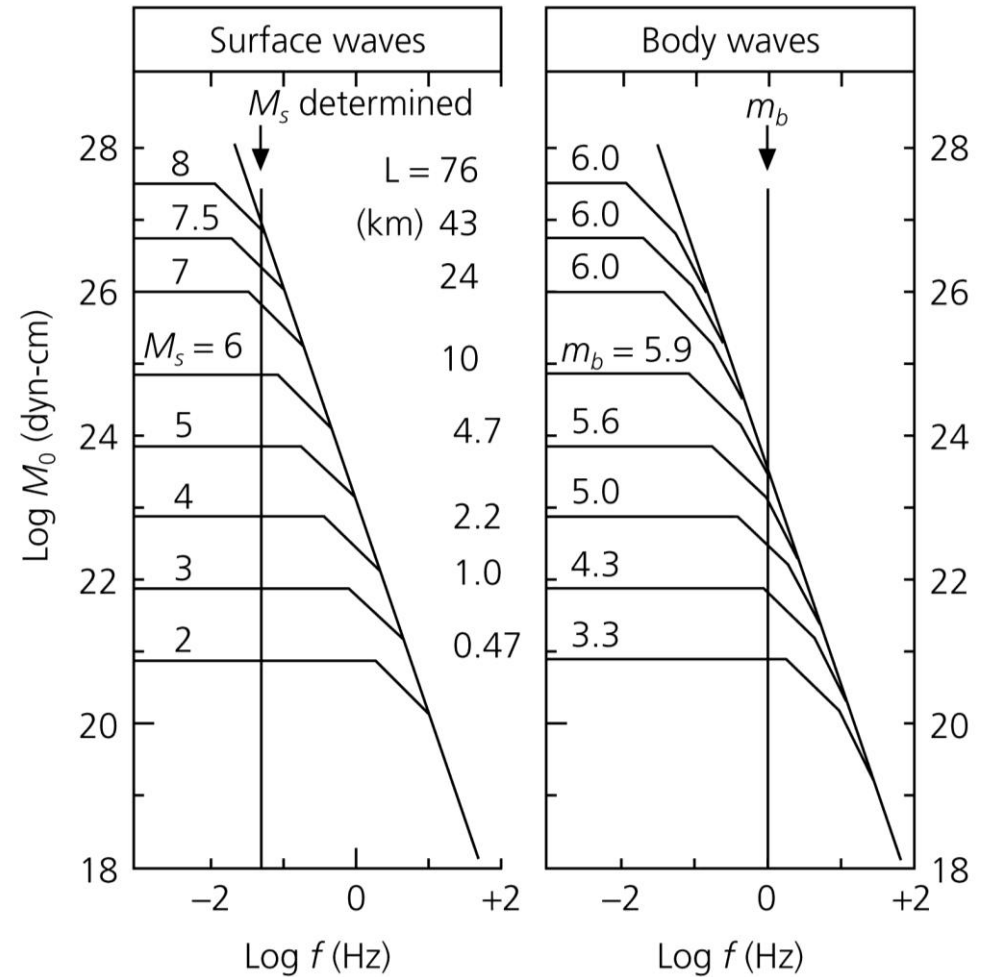


# LE DIVERSE GRANDEZZE RIFLETTONO IL RILASCIO DI ENERGIA IN PERIODI DIVERSI

1 s – Magnitudo body waves  $m_b$

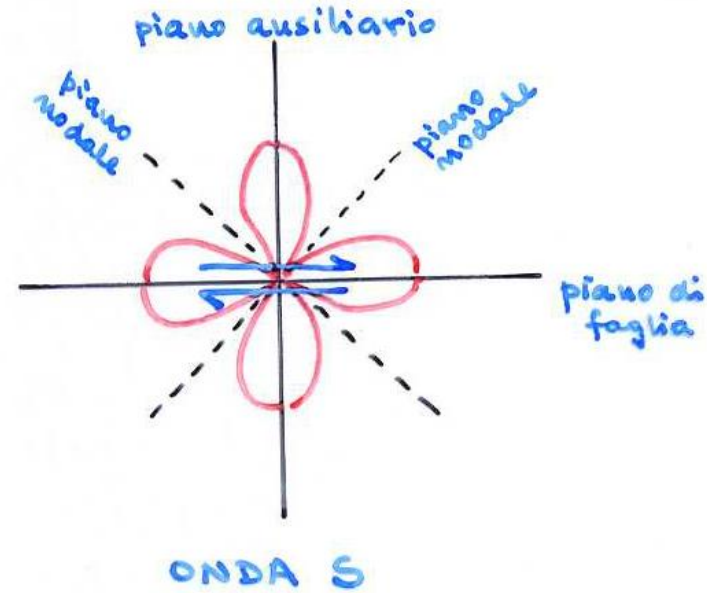
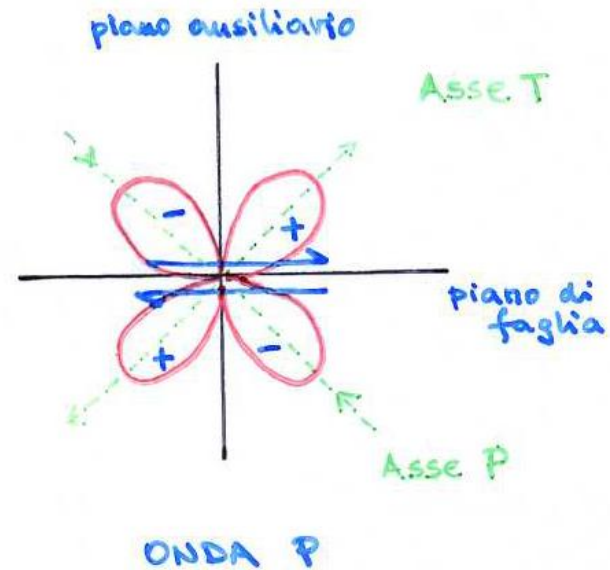
20 s – Magnitudo onde superficiali  $M_s$

Magnitudo lungo periodo  $M_w$  derivate dal momento sismica  $M_0$



## PROFILI RADIAZIONE

I terremoti non irradiano onde sismiche uniformemente in tutte le direzioni, ma hanno profili di radiazione caratteristici:

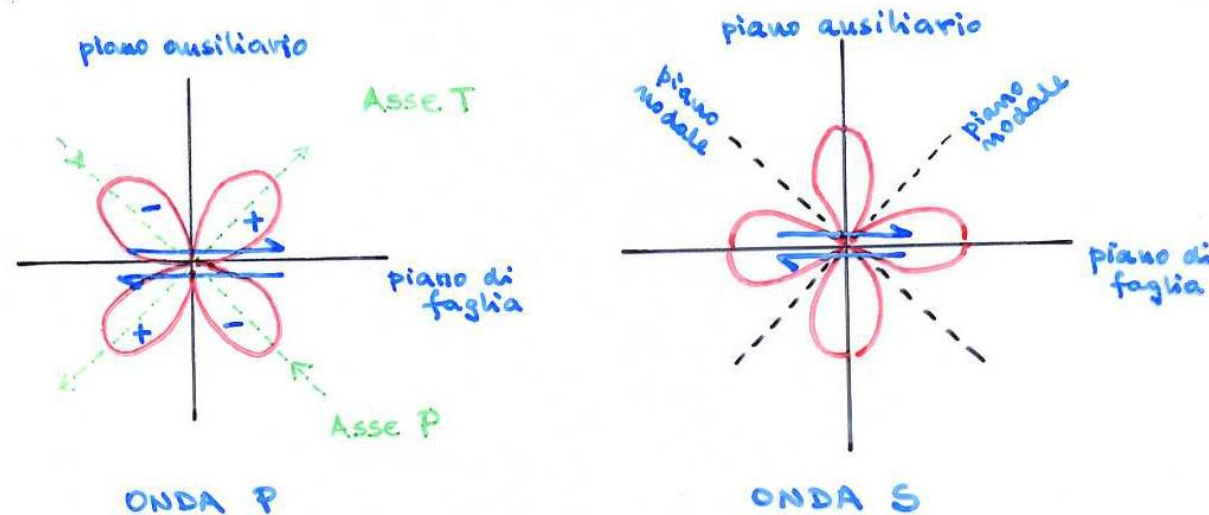


Il terremoto non irradia onde P lungo la faglia e lungo la direzione perpendicolare ad essa (piani nodali), mentre per le onde S tali direzioni hanno il Massimo di radiazione. Per le onde P il Massimo di radiazione avviene nella direzione di massima compressione (con polarità primo impulso negativa) e di massima tensione (con polarità primo impulso positiva).

L'ampiezza dell'onda che arriva alla stazione dipende fortemente dall'azimuth della stazione rispetto alla faglia.

Una certa distribuzione di stazioni potrà quindi sovrastimare oppure sottostimare la magnitude.

Per le ragioni sopra esposte si preferisce caratterizzare la entità del terremoto mediante un parametro più fisico, il momento sismico e con una magnitude legata ad esso.



- As discussed in the elastic rebound model, a tectonic earthquake arises from abrupt displacement of a segment of a fault. The area  $S$  of the fractured segment and the amount by which it slipped  $D$  can be inferred.
- Together with the rigidity modulus  $m$  of the rocks adjacent to the fault, these quantities define the seismic moment  $M_0$  of the earthquake. Assuming that the displacement and rigidity are constant over the area of the rupture:

$$M_0 = \mu SD$$

- The seismic moment can be used to define a **moment magnitude** ( $M_w$ ). The definition adopted by the responsible commission of IASPEI is:

$$M_w = \frac{2}{3} (\log_{10} M_0 - 9.1)$$

In this equation  $M_0$  is in N m

- $M_w$  is more appropriate for describing the magnitudes of very large earthquakes. It has largely replaced  $M_s$  in scientific evaluation of earthquake size, although  $M_s$  is often quoted in reports in the media.

# Earthquake: energy

- The definition of earthquake magnitude relates it to the logarithm of the amplitude of a seismic disturbance. Noting that the energy of a wave is proportional to the square of its amplitude it should be no surprise that the magnitude is also related to the logarithm of the energy. Several equations have been proposed for this relationship.
- An empirical formula worked out by Gutenberg relates the energy release  $E$  to the surface-wave magnitude  $M_s$ :

$$\log_{10}E = 4.8 + 1.5M_s$$

•The logarithmic nature of the formula means that the energy release increases very rapidly with increasing magnitude. For example, when the magnitudes of two earthquakes differ by 1, their corresponding energies differ by a factor 32 ( $=10^{1.5}$ ). Hence, a magnitude 7 earthquake releases about 1000 times the energy of a magnitude 5 earthquake. Another way of regarding this observation is that it takes 1000 magnitude 5 earthquakes to release the same amount of energy as a single large earthquake with magnitude 7.

Earthquake magnitude	Number per year	Annual energy [ $10^{15}$ J yr $^{-1}$ ]
$\geq 8.0$	$\approx 1$	$\approx 100$
7–7.9	17	190
6–6.9	134	45
5–5.9	1,319	14
4–4.9	$\approx 13,000$	4
3–3.9	$\approx 130,000$	1
2–2.9	$\approx 1,300,000$	0.4

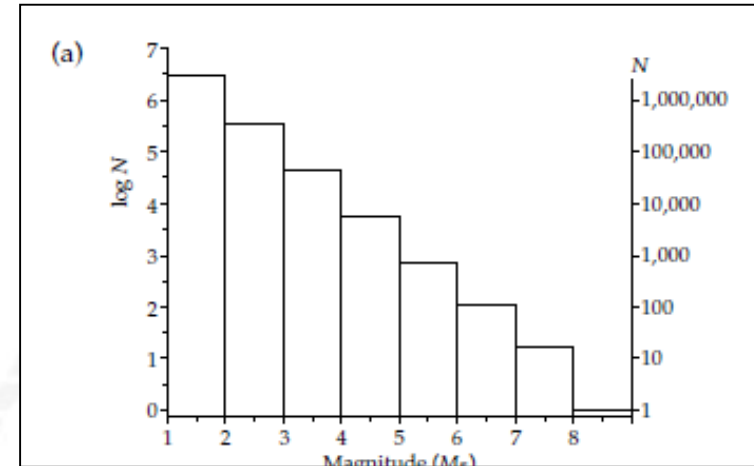
# Frequenza dei terremoti

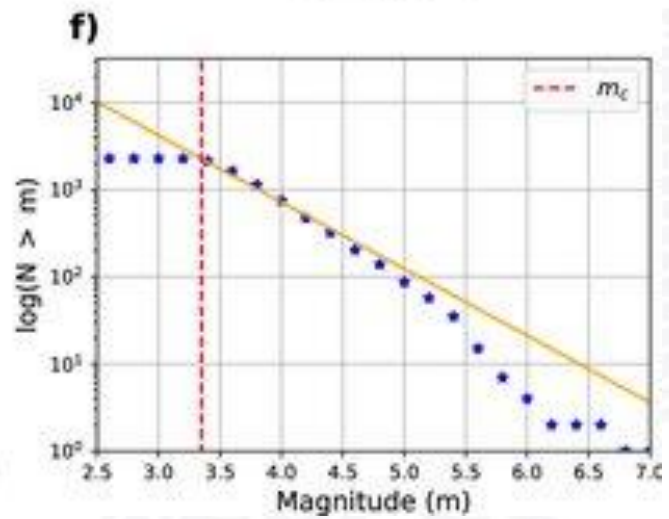
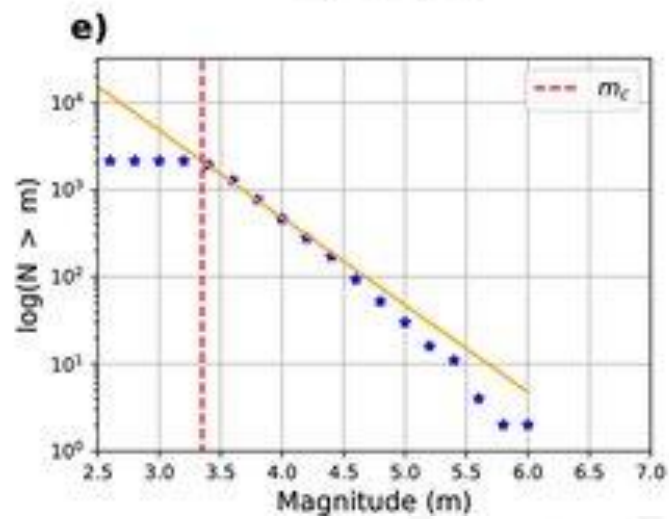
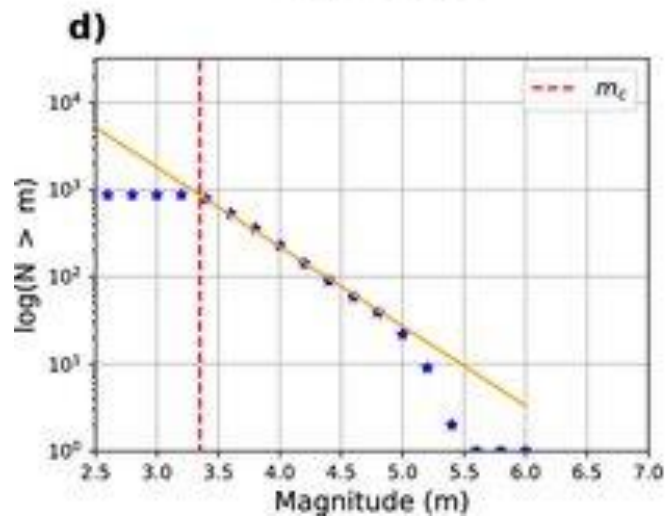
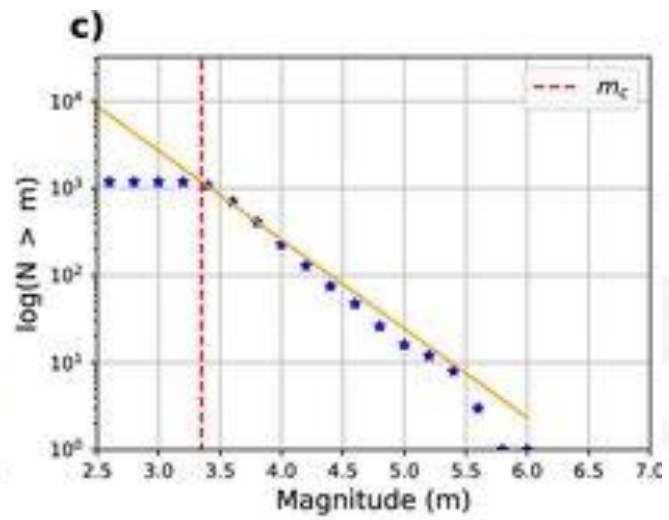
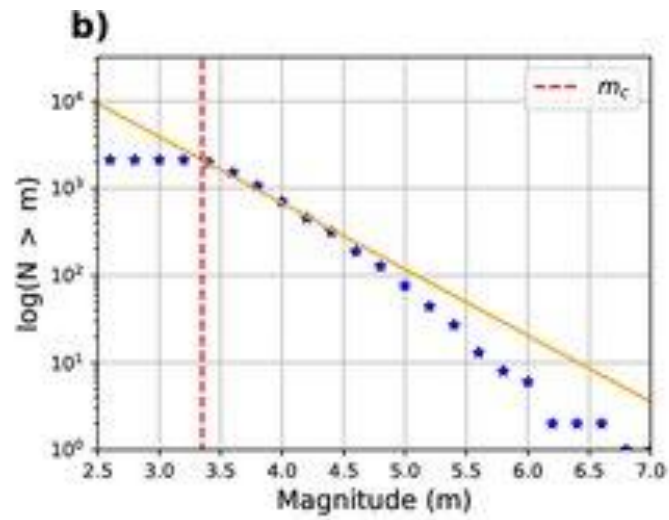
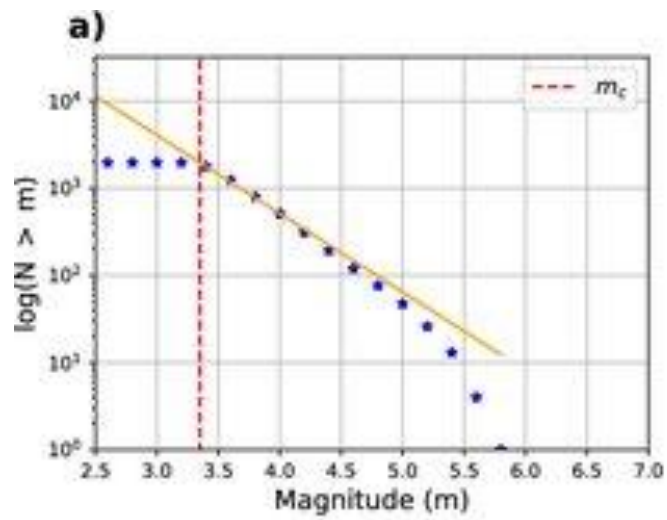
• Ogni anno si verificano molti piccoli terremoti e solo pochi grandi. Secondo una compilazione pubblicata da Gutenberg e Richter nel 1954, negli anni 1918-1945 il numero medio annuo di terremoti di magnitudo 4-4,9 è stato di circa 6000, mentre i terremoti di magnitudo 6-6,9 sono stati in media circa 100 all'anno. La relazione tra la frequenza annuale ( $N$ ) e la magnitudo ( $M_s$ ) è logaritmica ed è data da un'equazione della form

$$\log_{10} N = a - bM_s \quad [Eq 9]$$

- Il valore di  $a$  varia tra circa 8 e 9 da una regione all'altra, mentre  $b$  è circa l'unità per la sismicità regionale e globale.
- Valori bassi di  $b$  indicano aree meno fratturate e caratterizzano i rift continentali e i terremoti profondi.
- Valori elevati di  $b$  indicano aree altamente fratturate e sono tipici delle dorsali oceaniche.

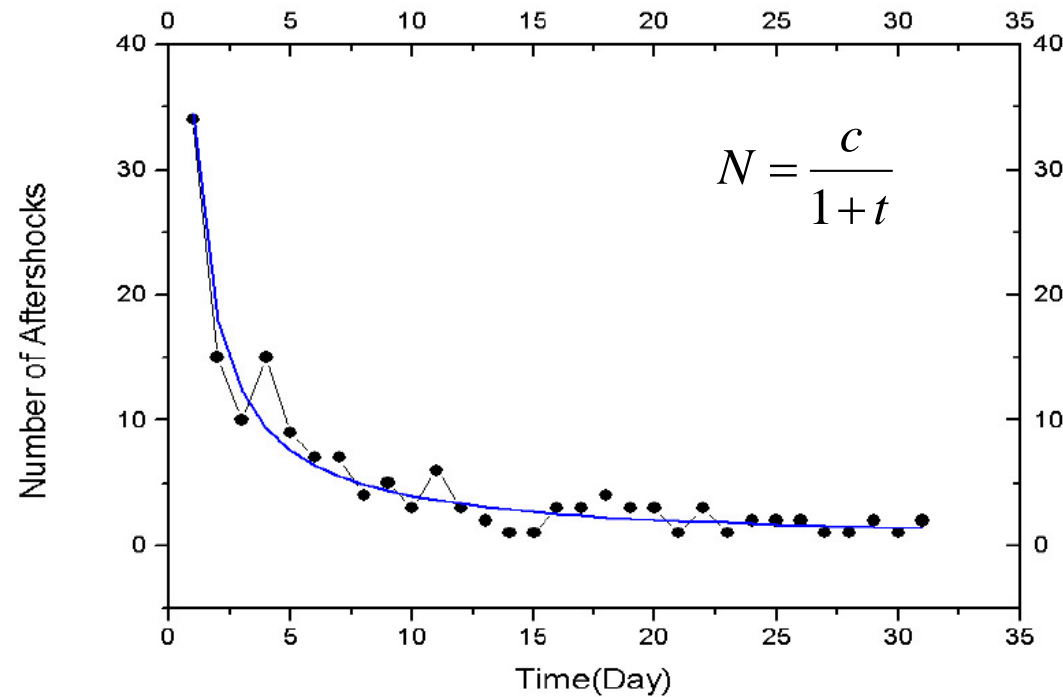
**La legge di Gutenberg Richter caratterizza un'area sismica ed è importante per la pericolosità sismica.**

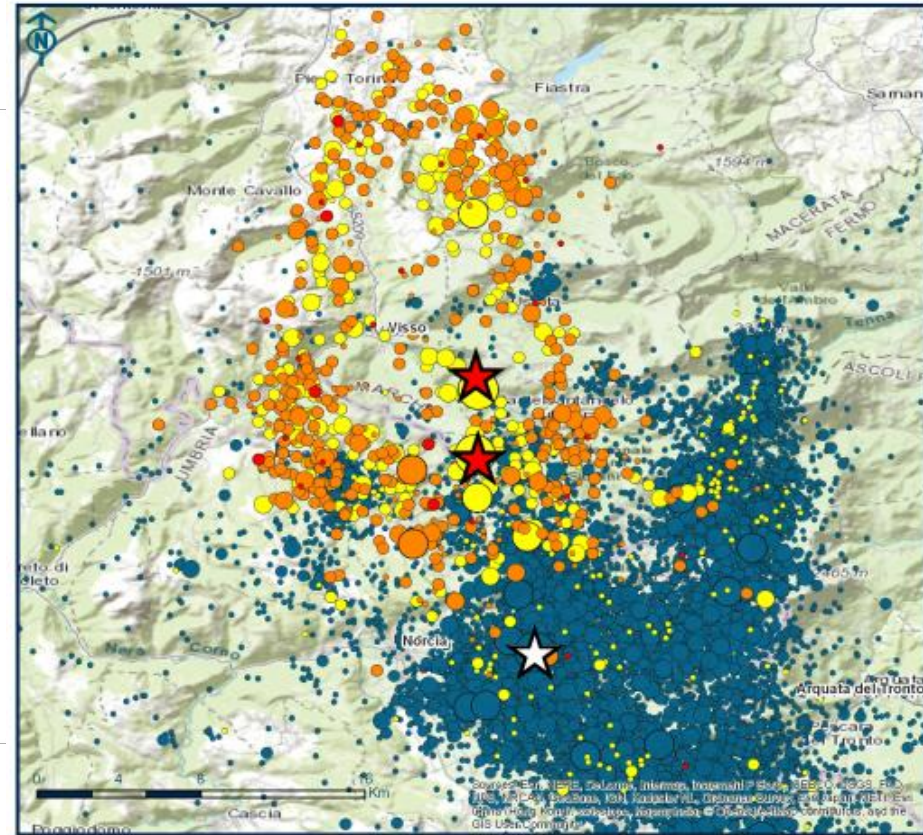
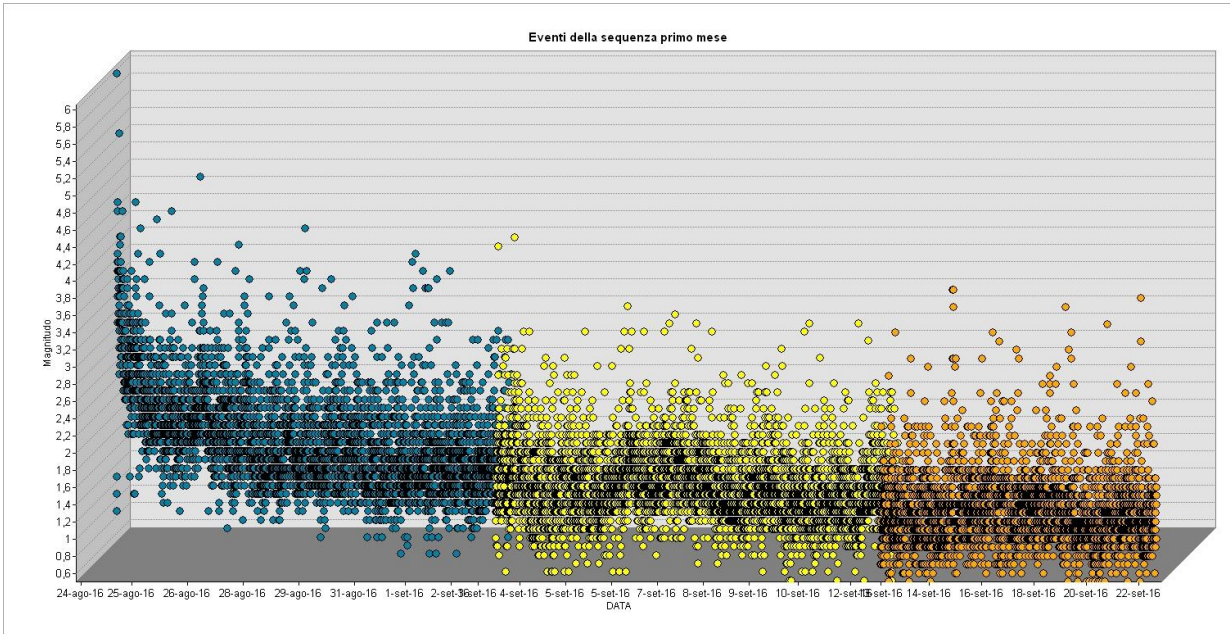




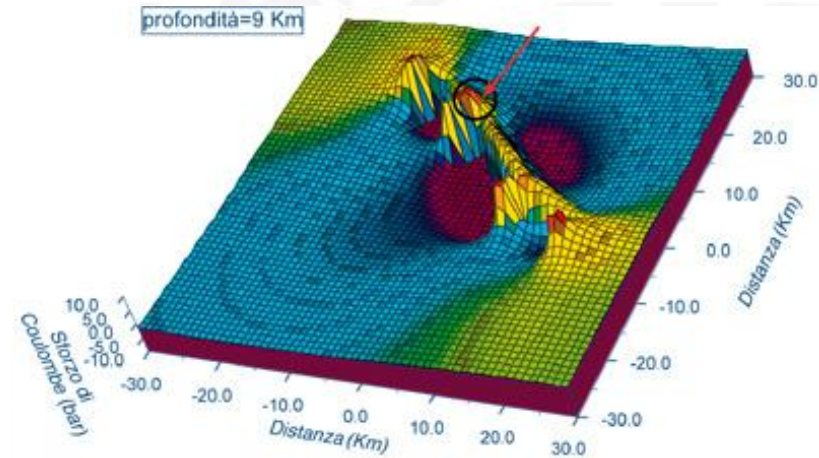
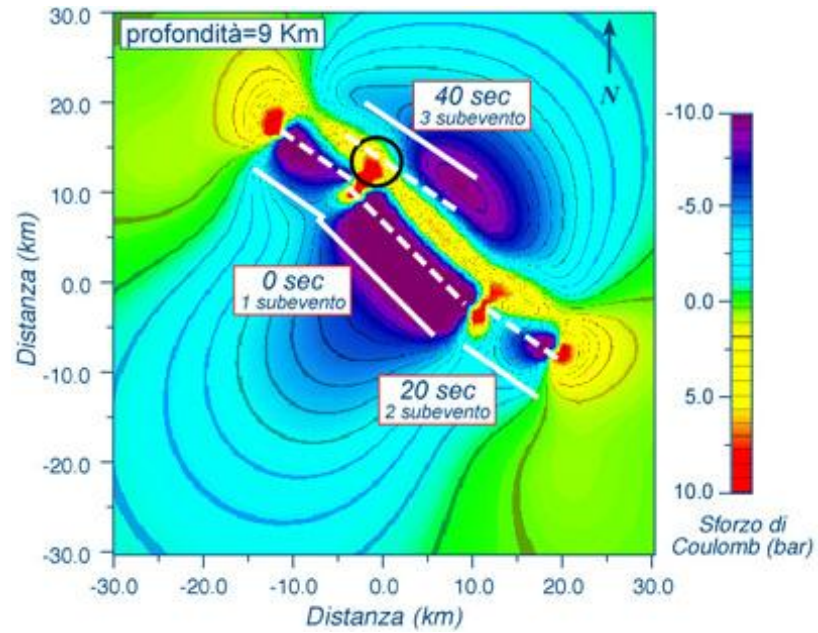
# Terremoto: scosse di assestamento (repliche)

1. Si verificano dopo ogni forte terremoto
2. La replica più grande è tipicamente di almeno un'unità di magnitudo inferiore all'evento principale
3. La somma dell'energia associata alla sequenza di scosse di assestamento è solitamente pari al 5-10% di quella rilasciata dall'evento principale.
4. Studiando i terremoti giapponesi (1981) OMORI ha dimostrato che il numero di repliche diminuisce con il tempo dopo l'evento principale e segue la legge di OMORI.





## Terremoto Irpinia 1980



Visco-elastic modeling and stress Modellazione visco-elastica ed evoluzione delle sollecitazioni dal 1511 al 2004 tenendo conto delle deformazioni coseismiche e post-sismiche di ogni grande evento passato

(Borghi, Aoudia- *Tectonophysics*, 2009)

- Metodo degli elementi finiti 3-D
- confini del dominio che si estendono a 100 km di distanza dal punto più esterno di ciascuna faglia
- modello di Terra composto da una crosta superiore elastica di 16 km di spessore, una crosta inferiore viscoelastica con viscosità  $10^{19}$  Pa s tra una profondità di 16 km e la Moho a 37 km e un mantello litosferico viscoelastico con viscosità  $10^{21}$  Pa s.

