

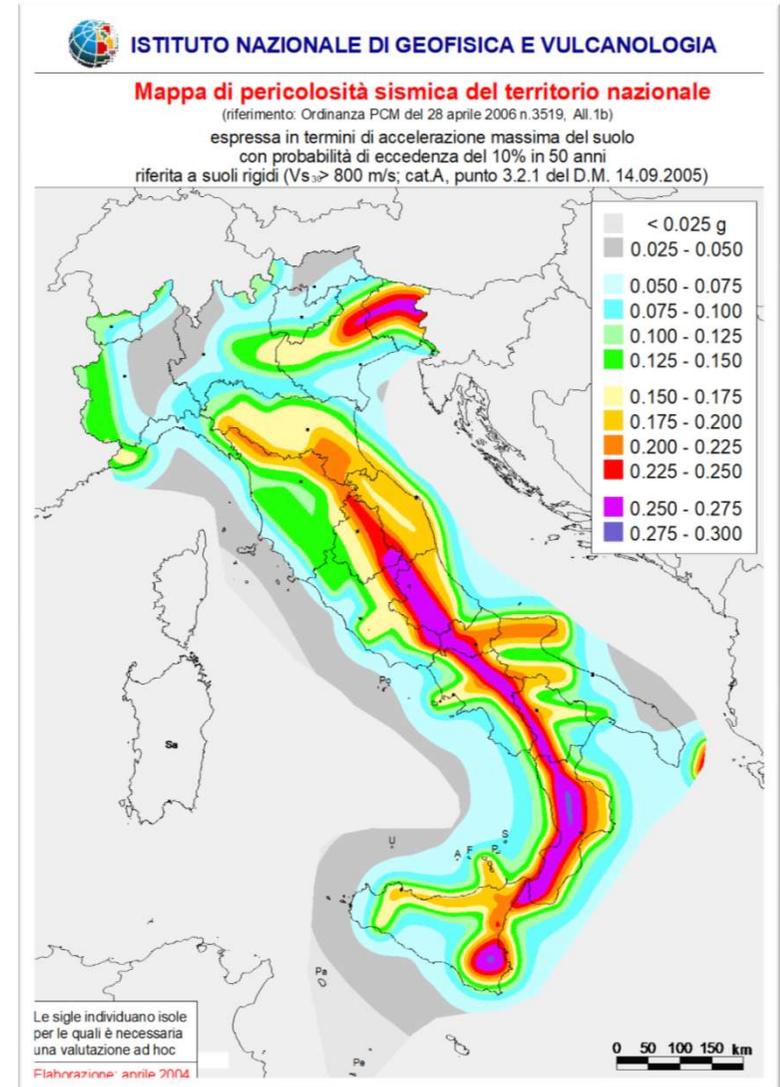
Elementi di sismologia per la valutazione della Pericolosità Sismica

Lucia Luzi



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

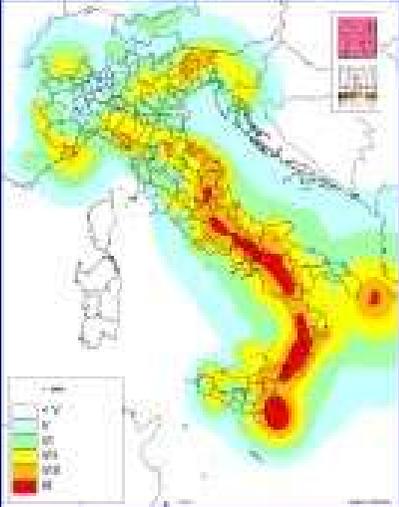
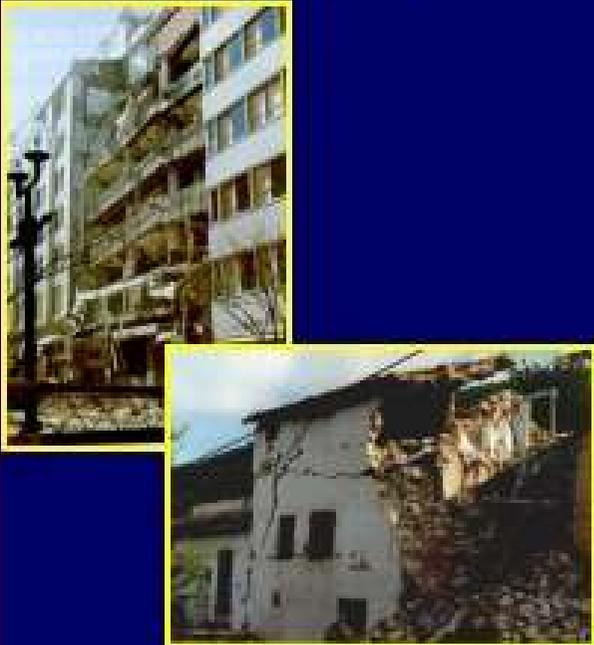
lucia.luzi@ingv.it



Rischio = Pericolosità * Esposizione * Vulnerabilità

La pericolosità è controllata dalla natura

La vulnerabilità e l'esposizione sono controllate dall'uomo

Nature	Engineers	Planners
<h2>Hazard</h2>	<h2>Vulnerability</h2>	<h2>Exposure</h2>
		

Pericolosità sismica

La **pericolosità sismica** è la caratterizzazione dei fenomeni causati da un terremoto (scuotimento del terreno, fratturazione del suolo, spostamenti permanenti).

Il **rischio** si riferisce alle conseguenze della pericolosità, come danni alle strutture, perdite umane o danni economici

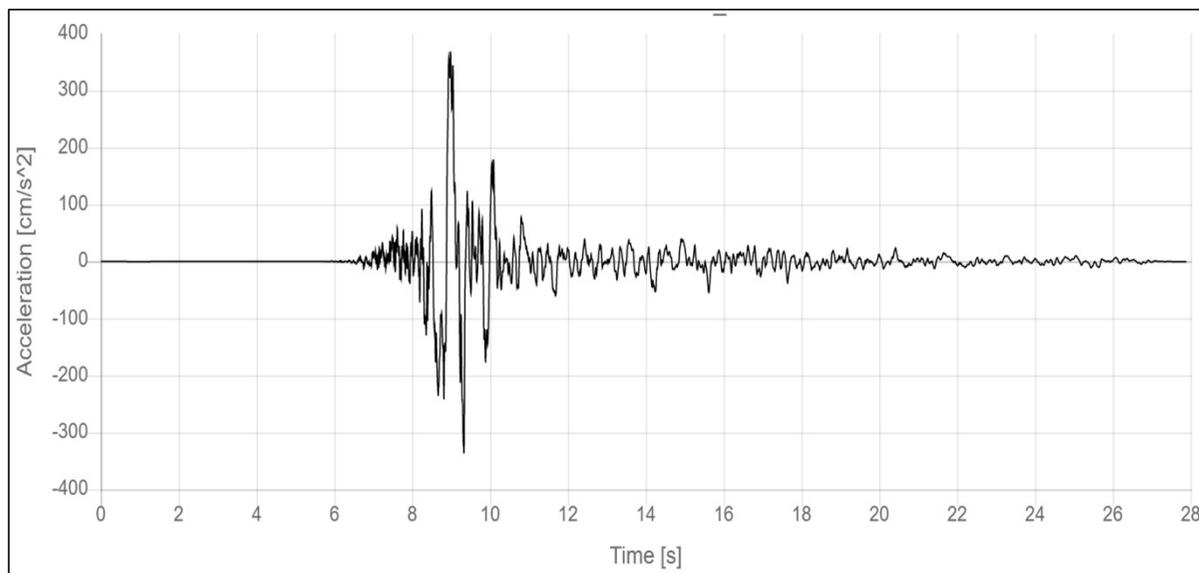
Se consideriamo lo **scuotimento del terreno** la pericolosità può essere definita in modo probabilistico o deterministico

- **Pericolosità sismica probabilistica (ingl. Probabilistic Seismic Hazard, PSH)** indica lo **scuotimento del suolo atteso per un sito** associato ad una **probabilità**
- **Pericolosità sismica deterministica** indica lo **scuotimento in un sito generato da un terremoto di riferimento (scenario)**, di solito il massimo possibile per un'area.

La pericolosità non è una quindi una previsione (cioè l'esatto scuotimento del terreno e il momento in cui si verificherà)

Come si misura lo scuotimento

Asse Y
Moto del
suolo
[accelerazione
velocità
spostamento]

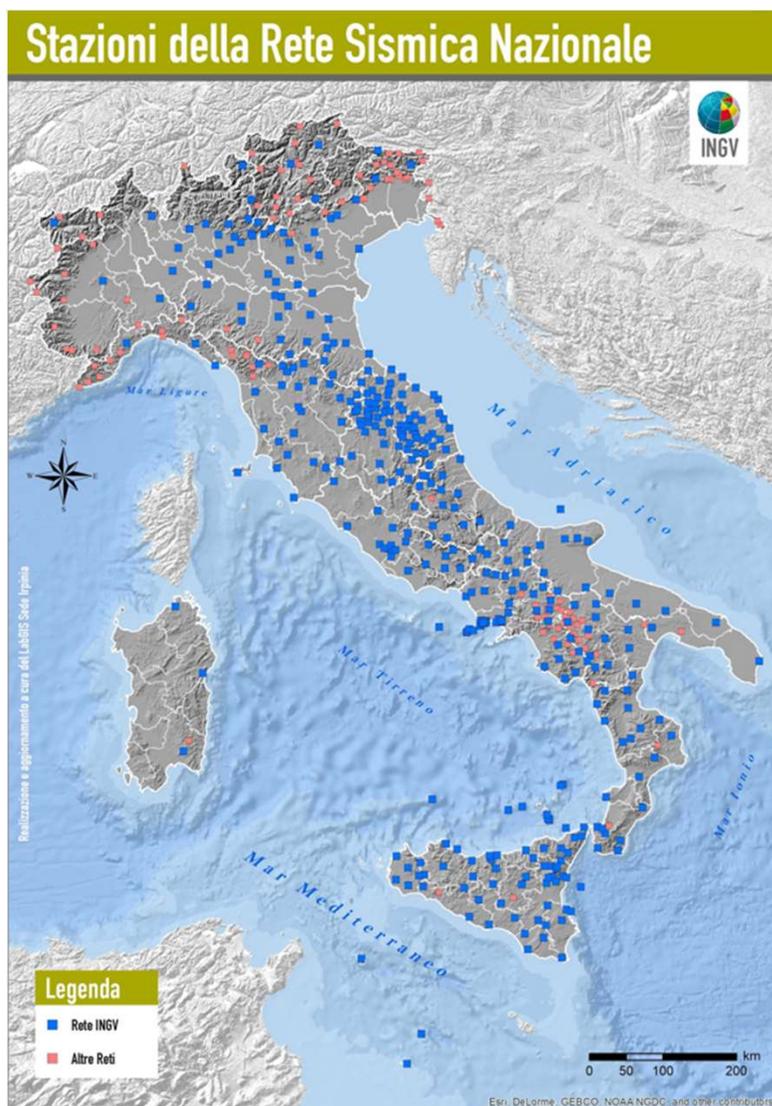


Segnale
Forma d'onda
Serie temporale

Asse X
Tempo

Il moto del suolo è il risultato dell'interazione tra il terreno e le onde **elastiche (o meccaniche)** generate da un impulso come ad esempio un terremoto

Come si misura lo scuotimento del terreno



La Rete Sismica Nazionale è composta da circa 500 stazioni (BB, SP e accelerometri), che comunicano in tempo reale con l'Osservatorio Nazionale dei Terremoti 24/7 per localizzare gli eventi e calcolare la magnitudo

<http://www.ingv.it/it/monitoraggio-e-infrastrutture-per-la-ricerca/reti-di-monitoraggio/l-ingv-e-le-sue-reti/rns>

Caratterizzazione dello scuotimento

Diversi parametri indicano la severità dello scuotimento

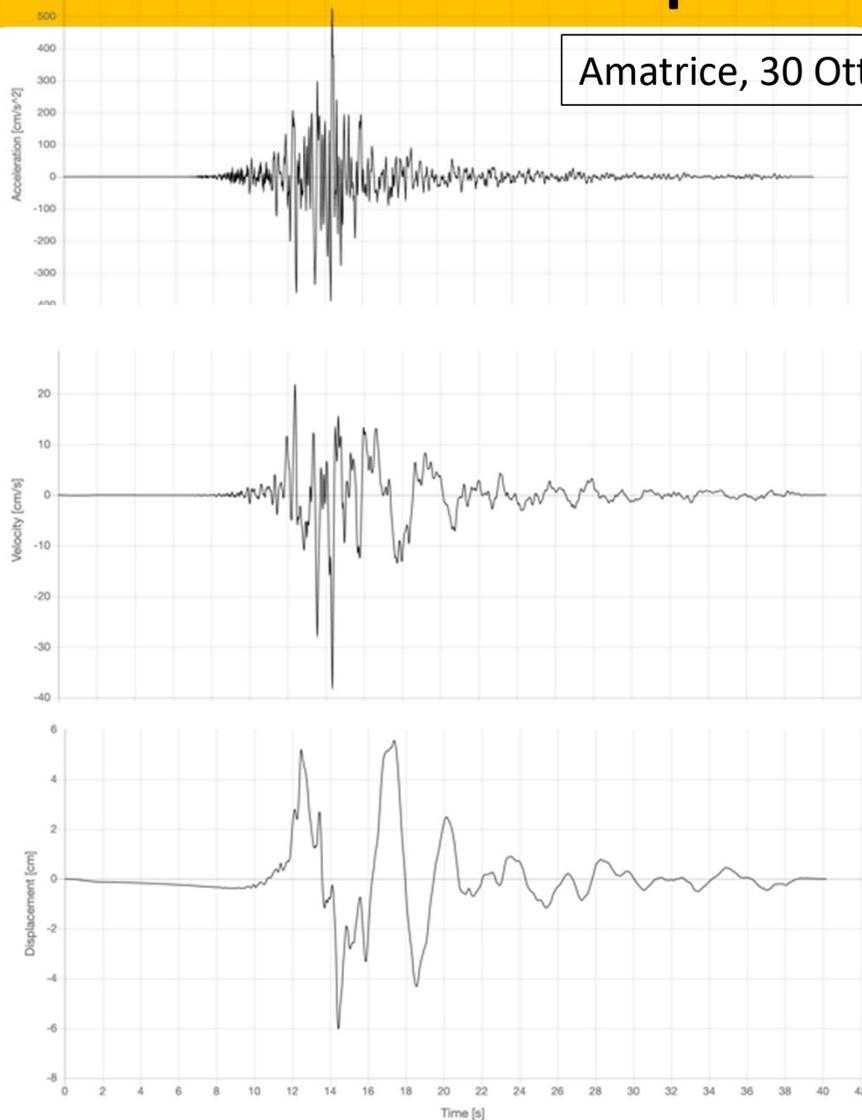
Dominio del tempo – accelerazione / velocità / spostamento di picco, durata

Parametri integrali – intensità di Arias, intensità di Housner

Dominio della frequenza – spettri di Fourier, spettri di risposta

Dall'accelerazione allo spostamento

Integrale



Accelerazione

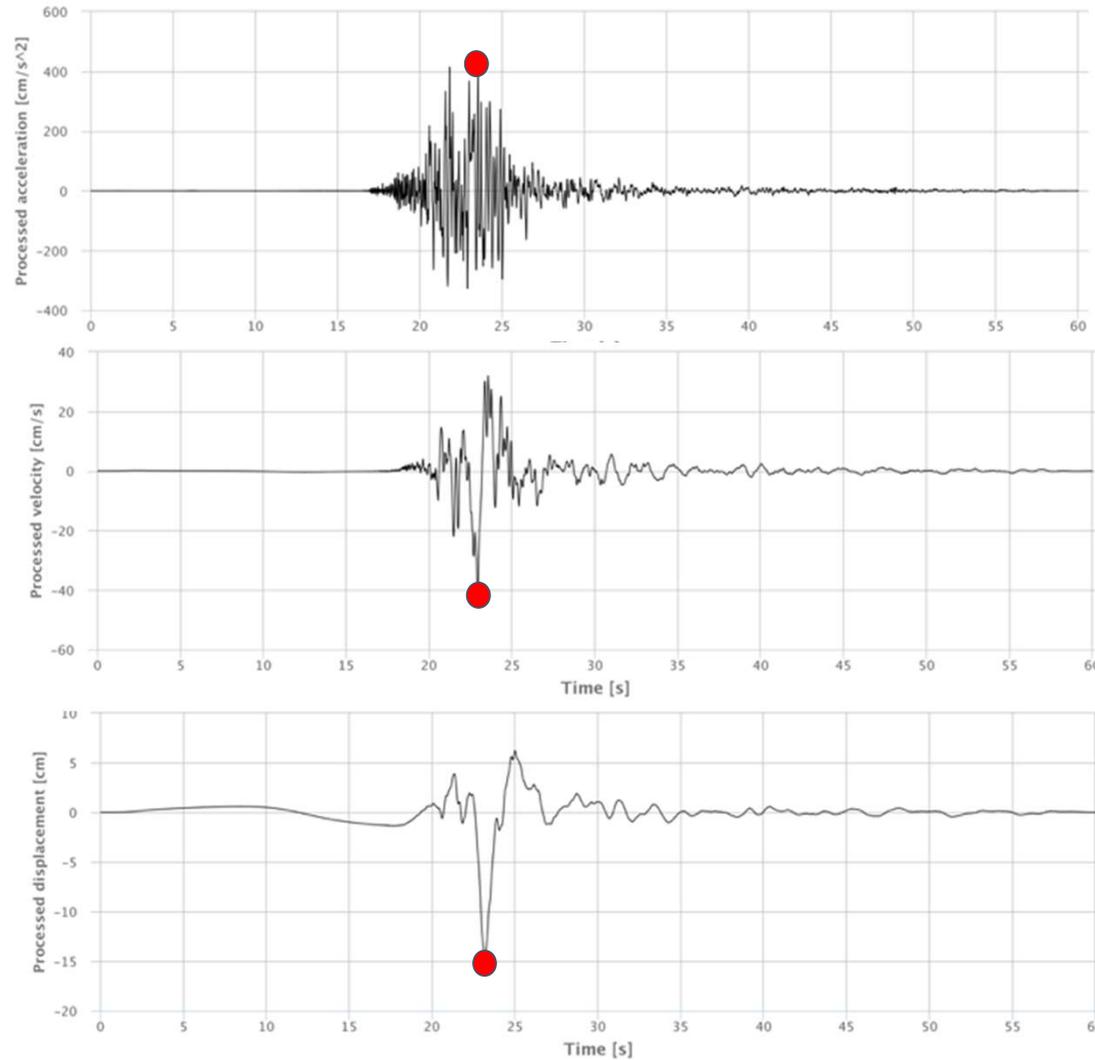
Velocità

Spostamento

Derivata

Picco di Accelerazione (PGA), Velocità (PGV), Spostamento (PGD)

**Dominio del
tempo**



PGA (EW)
426 cm/s²

*30-10-2016 Mw
6.5 Accumoli
R = 18.6 km*

PGV (EW)
-44.0 cm

PGD (EW)
-14.3 cm

from <http://esm.mi.ingv.it>

Durata

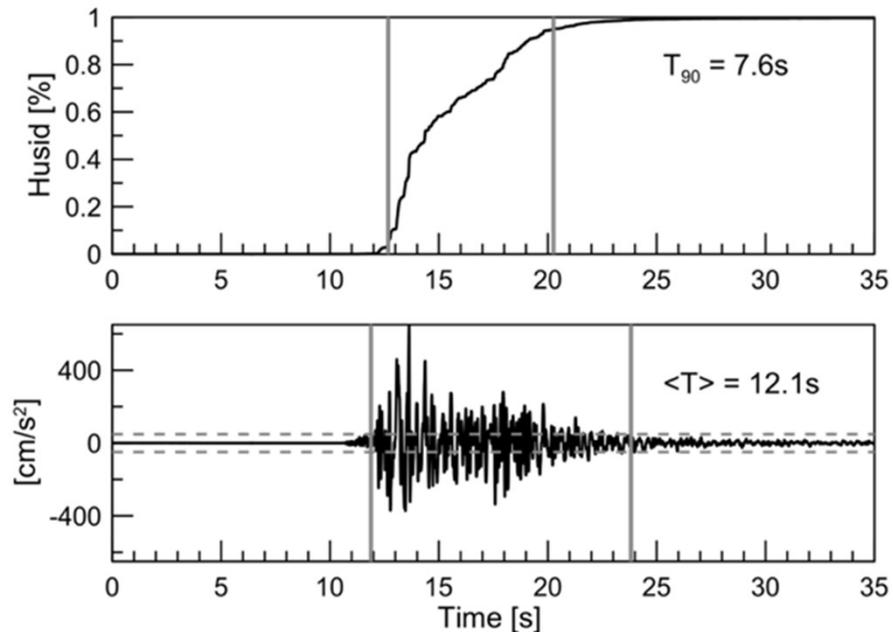
Durata significativa è l'intervallo di tempo in cui l'integrale del quadrato dell'accelerazione è compreso in un intervallo del suo valore totale. Di solito l'intervallo è compreso tra il 5% e il 95% o tra 5% e il 75% .

Bracketed duration: viene fissata una soglia, tipicamente 0.05g o 0.1g. La BD è intervallo di tempo che intercorre tra la prima e l'ultima eccedenza della soglia.

Dominio del
tempo

Durata significativa

Bracketed duration



Intensità di Arias, RMSA, CAV

Intensità di Arias

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} a^2(t) dt$$

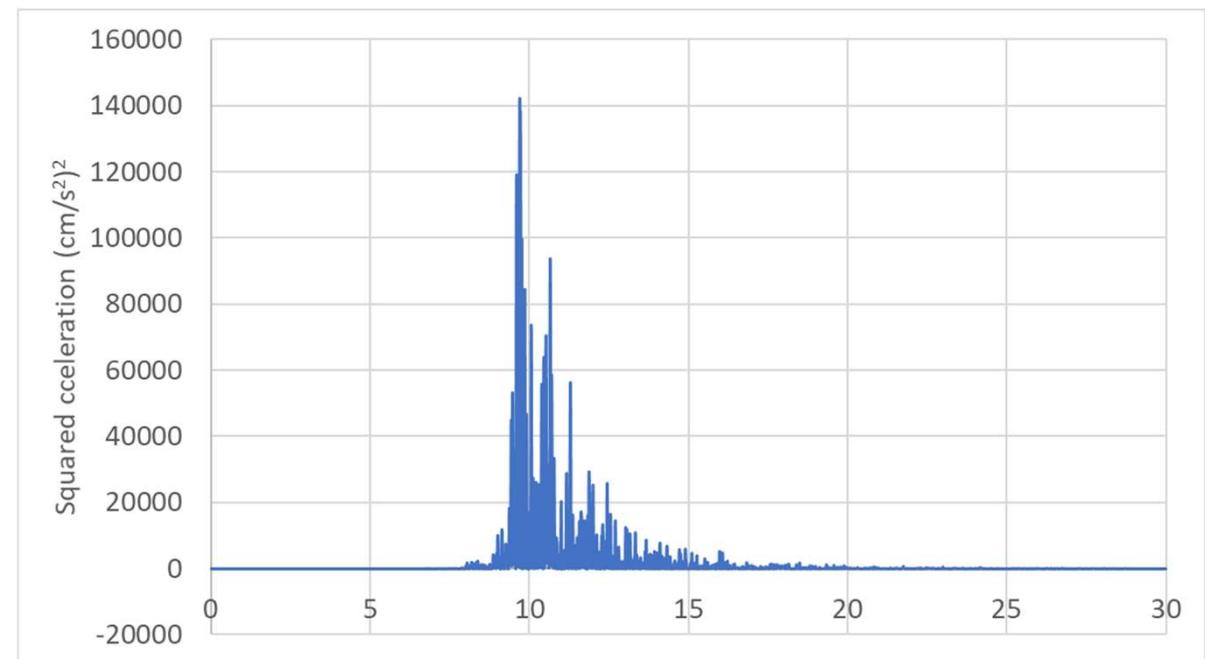
Root mean square acceleration

$$a_{rms} = \left\{ \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} a^2(t) dt \right\}^{1/2}$$

Cumulative absolute velocity

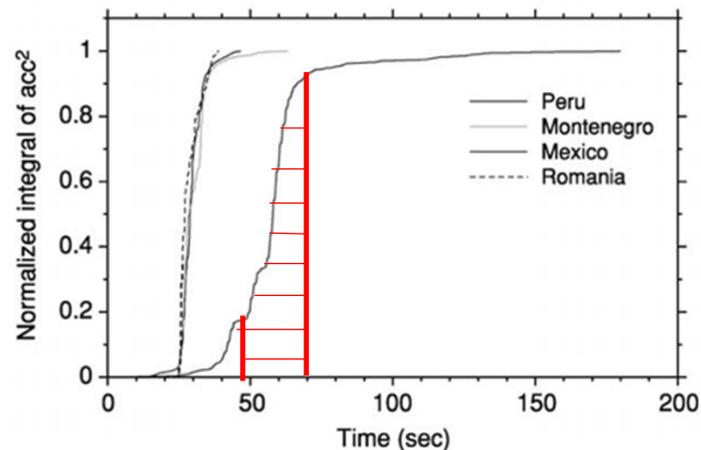
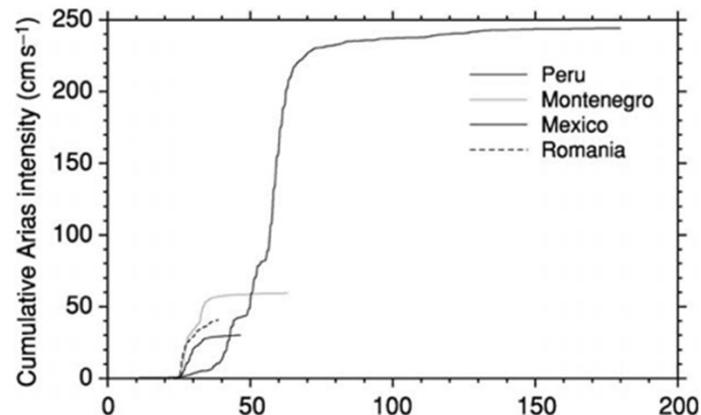
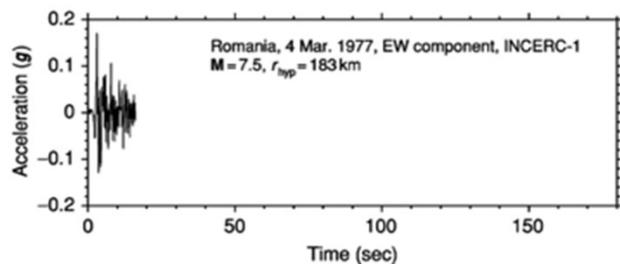
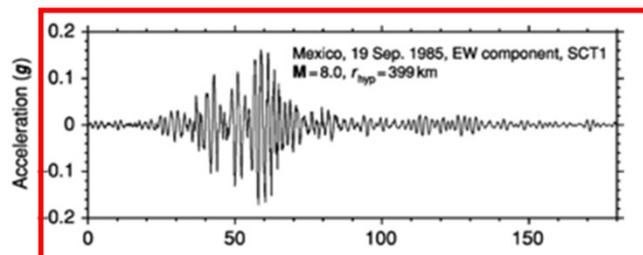
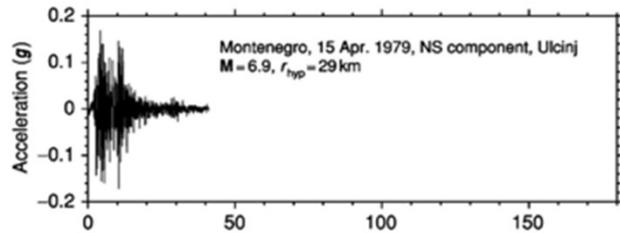
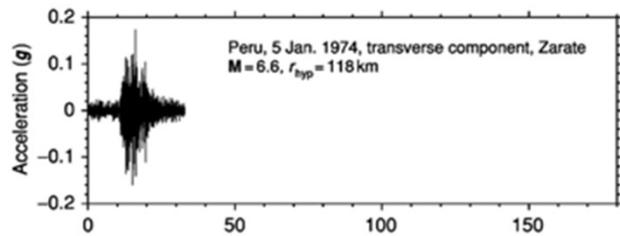
$$CAV = \int_0^{t_{max}} |a(t)| dt.$$

Parametri integrali



Accelerazione al quadrato

Husid plot



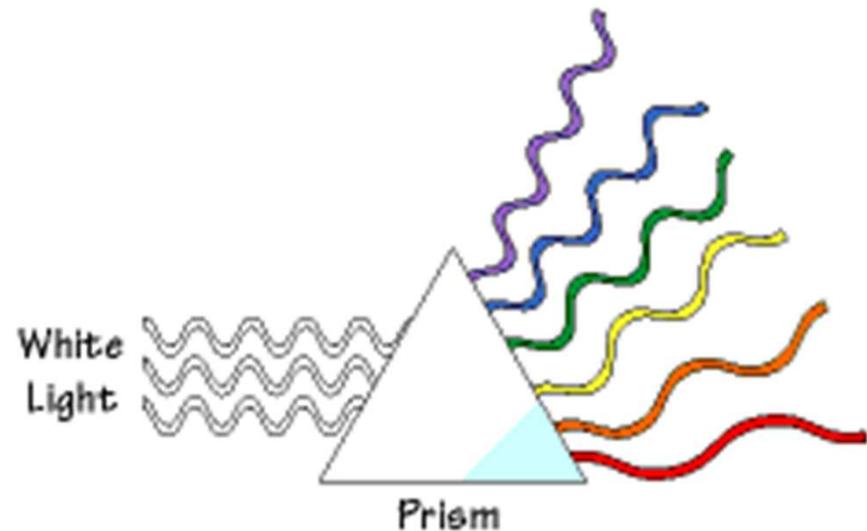
Parametri integrali

Il grafico dell'intensità di Arias nel tempo è conosciuto come Husid plot, che identifica l'intervallo di tempo in cui viene sprigionata la maggior parte dell'energia

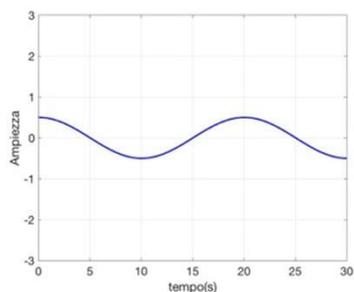
Segnali a frequenza multipla

La maggior parte dei segnali è composta da onde di frequenza diversa (e diversa ampiezza e fase). L'intervallo di frequenza si chiama anche "banda" e l'ampiezza «larghezza di banda»

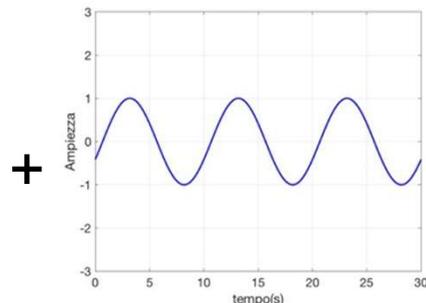
La luce è un segnale a frequenza multipla, e le singole frequenze che la compongono rappresentano ciò che noi distinguiamo come colori



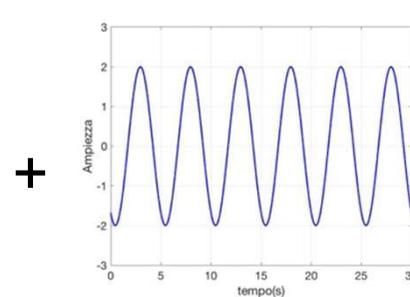
Esempio di segnale con frequenza multipla: somma di 4 funzioni coseno



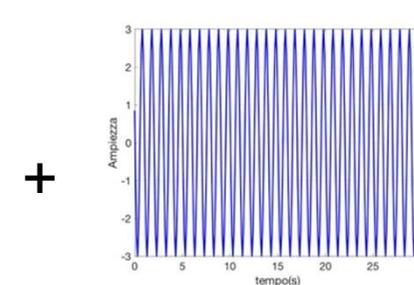
$A=0.5; T=20; \phi= 0.01$



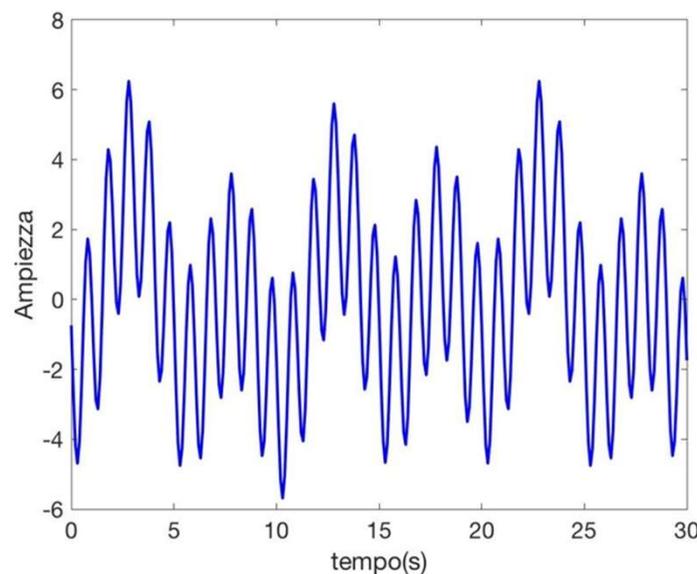
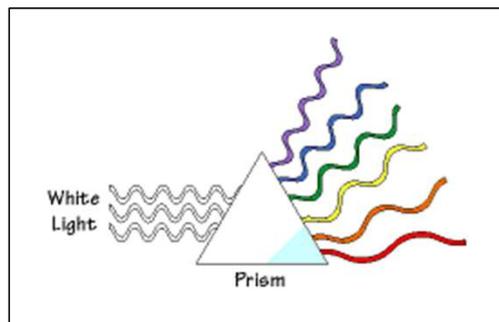
$A=1; T=10; \phi = 2.0$



$A=2; T=5; \phi = 10.0$



$A=3; T=1; \phi = 5.0$



Risultato della
somma: un segnale
a frequenza multipla

Modificato da prof. Albarello (UNISI)

Teorema di Fourier

Data una funzione continua (nel tempo) è sempre possibile trovare una combinazione di funzioni elementari (seno o coseno), che la rappresentano con la precisione desiderata:

$$F(t) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\alpha_n \cos\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) + \beta_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T}t\right) \right)$$

T è il periodo. La sommatoria richiede un numero infinito di addendi, ognuno dei quali è descritto da due parametri (α e β) e da un multiplo della frequenza n/T

Ampiezza

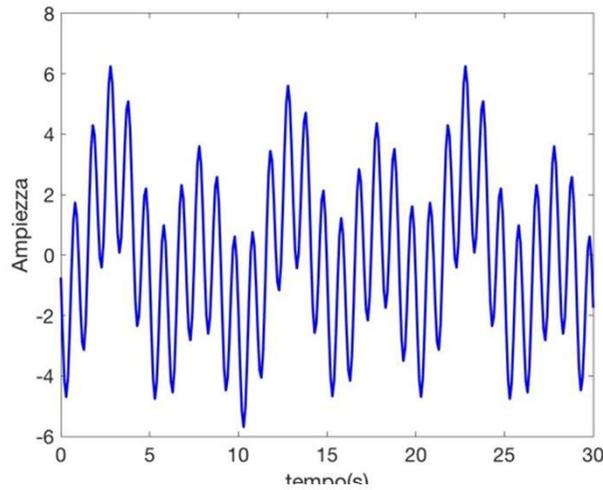
$$A_n^2 = \alpha_n^2 + \beta_n^2$$

$$\phi_n = \text{atan}\left(\frac{\beta_n}{\alpha_n}\right)$$

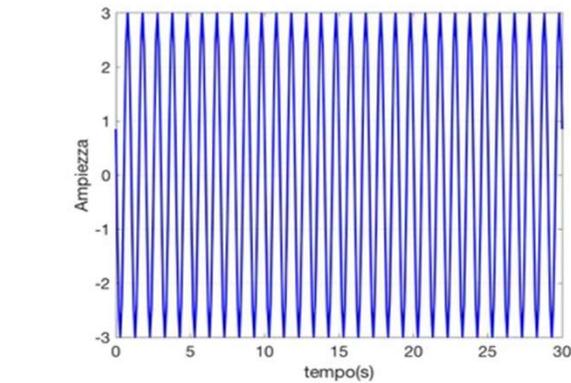
Fase

Modificato da prof. Albarello (UNISI)

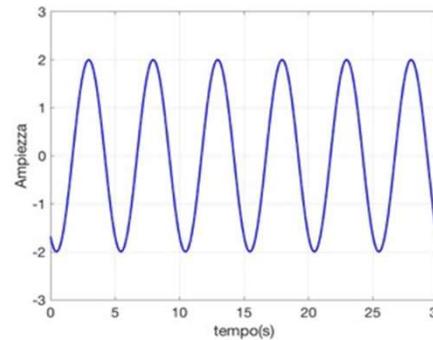
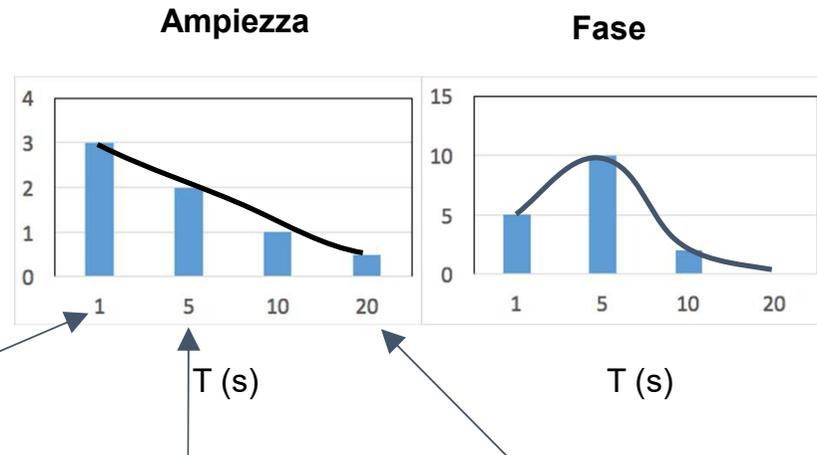
Spettro di ampiezza e di fase



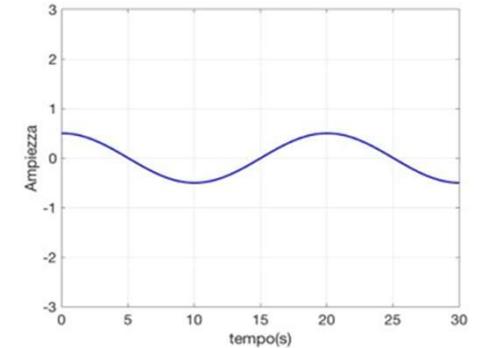
Trasformata di Fourier



$A = 3; T=1s; \text{phi} = 5s$



$A = 2; T=5s; \text{phi} = 10s$

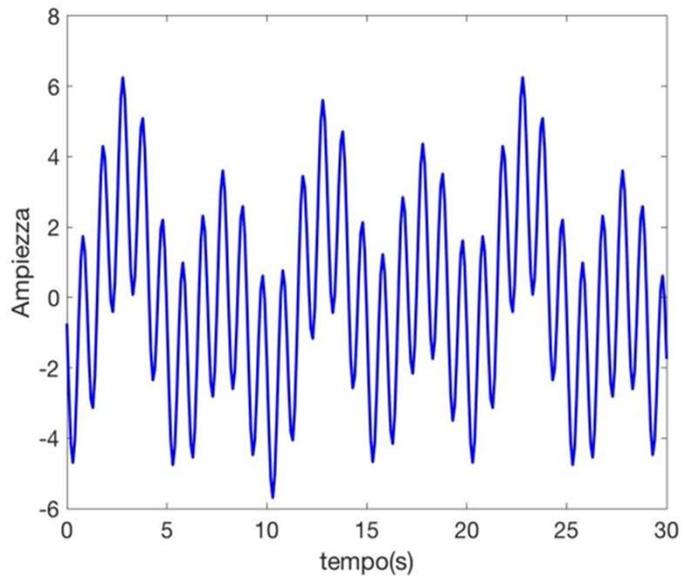


$A = 0.5; T=20s; \text{phi} = 0.01s$

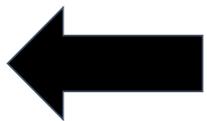
Modificato da prof. Albarello (UNISI)

Tempo o frequenza?

Dominio del tempo

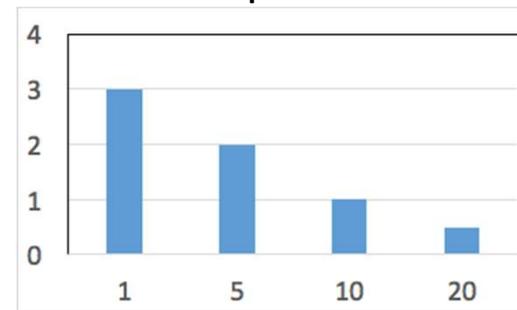


Trasformata di Fourier

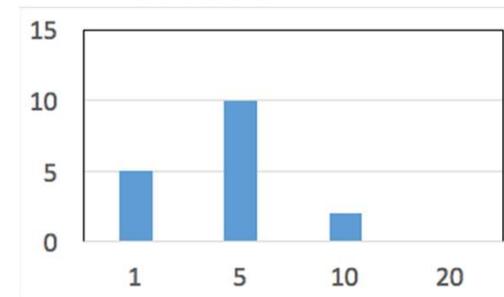


Dominio della frequenza

Spettro di ampiezza



Spettro di fase



Trasformata inversa di Fourier

T (s)

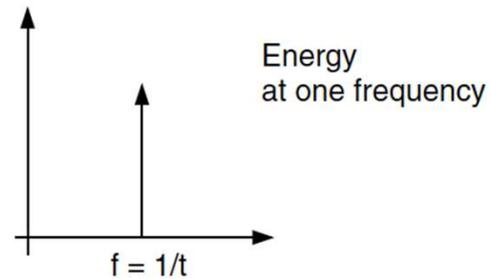
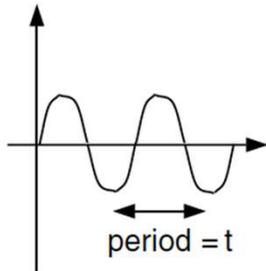
T (s)

Spettri di segnali con complessità crescente

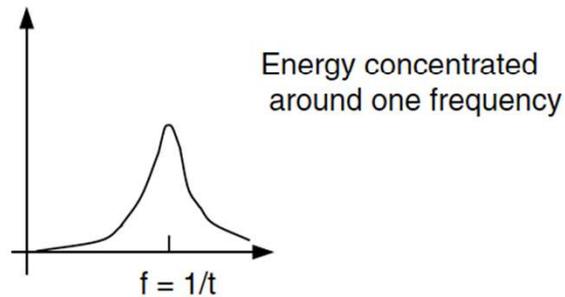
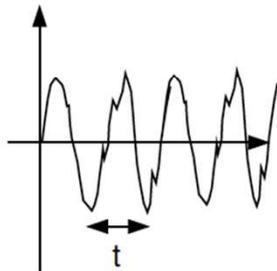
Signal

Spectrum

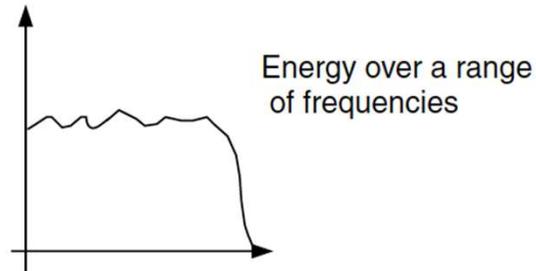
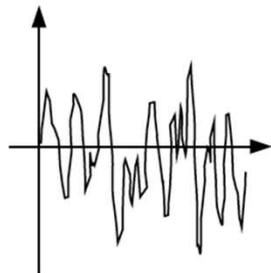
Harmonic



Quasi-harmonic



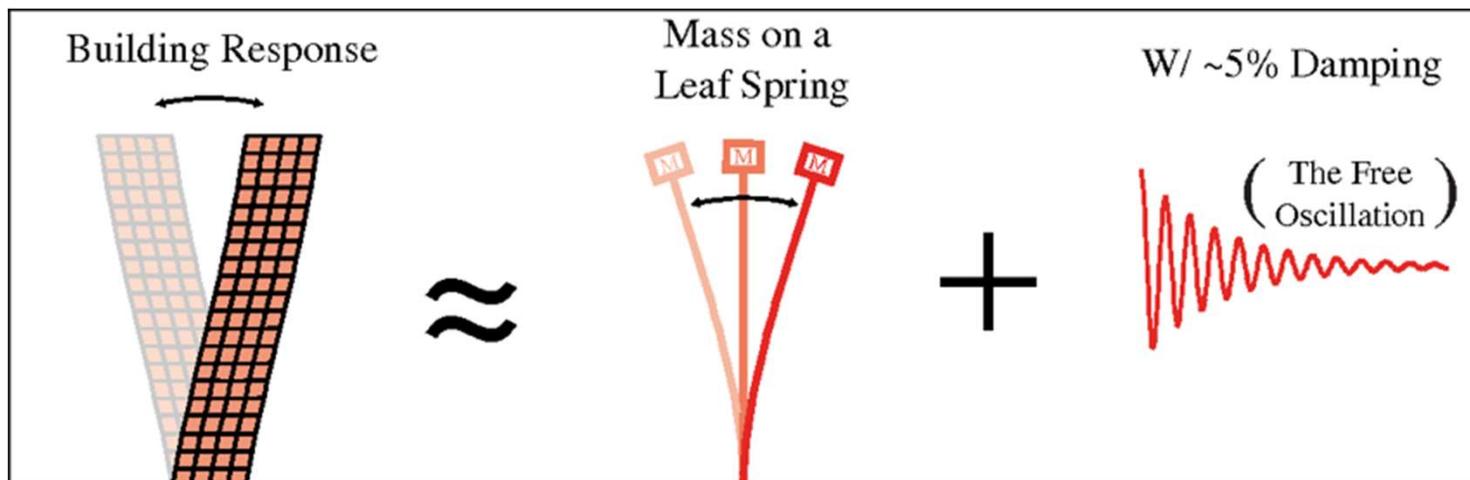
Random



Lo spettro di un segnale rappresenta la distribuzione dell'energia in funzione della frequenza

Spettro di risposta

Dominio
della
frequenza



Lo spettro di risposta è l'involuppo dei picchi **della risposta** (in spostamento, velocità o accelerazione) **di una serie di oscillatori di periodo proprio variabile**, che sono posti in movimento **dalla stessa vibrazione alla base**

Lo spettro di risposta può essere calcolato per diversi valori di smorzamento dell'oscillatore (di solito lo smorzamento è fissato al 5% dello smorzamento critico)

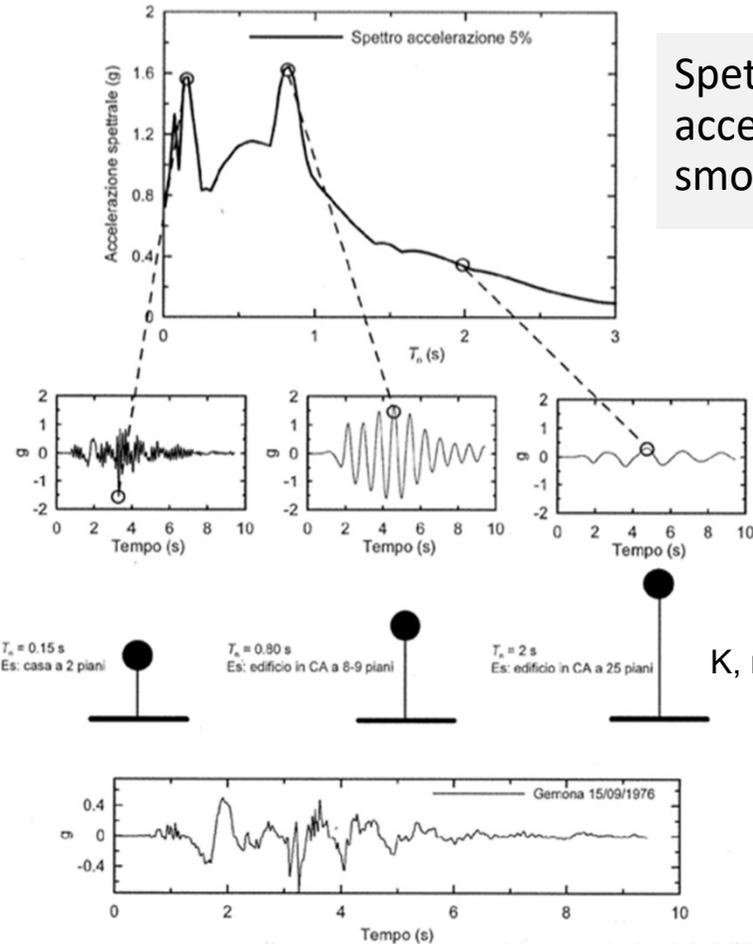
Spettro di risposta

4. Selezione del picco di ampiezza

3. Risposta del Sistema ad 1 grado di libertà

2. Equazione del moto

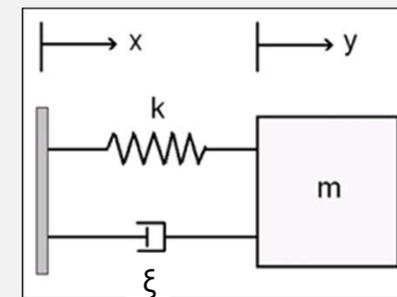
1. Accelerogramma (moto di input)



Spettro di risposta in accelerazione al 5% di smorzamento

Dominio della frequenza

Sistema ad 1 grado di libertà

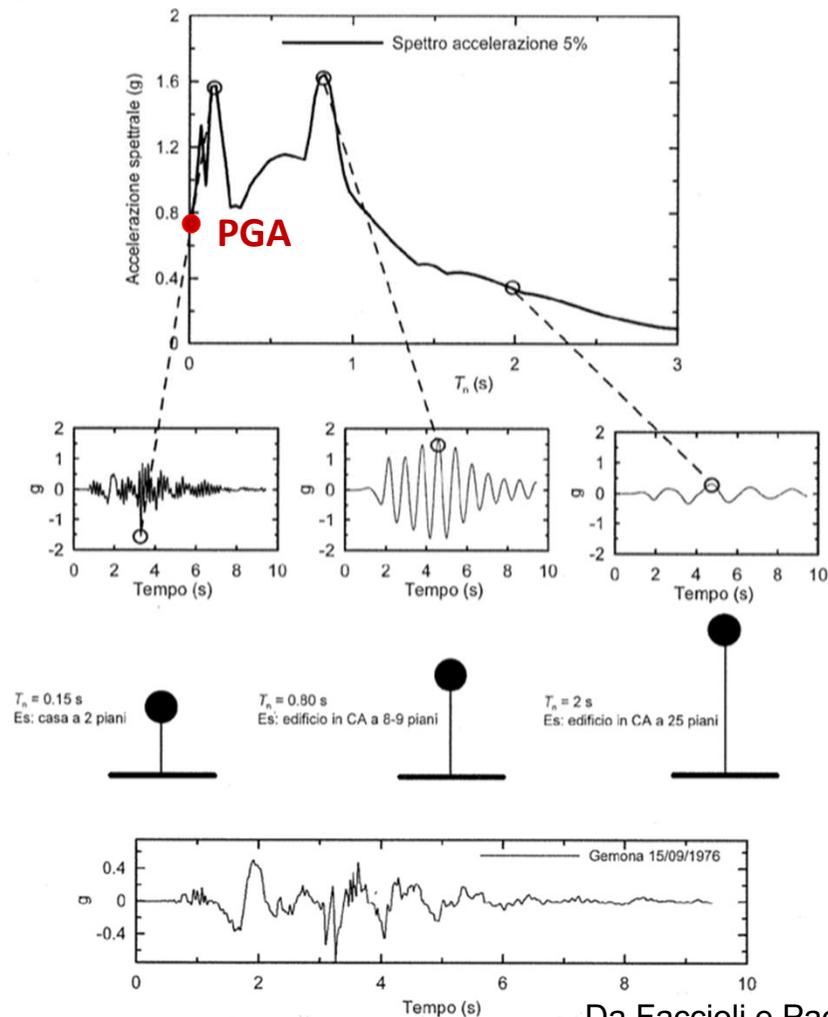


m = massa
 k = rigidezza
 ξ = smorzamento
 $\omega^2 = k/m$

Da Faccioli e Paolucci (2005)

Lo spettro di risposta per descrivere il moto del suolo

- In **ingegneria sismica** lo **spettro di risposta** è la rappresentazione dello scuotimento del suolo, nel dominio delle frequenze
- Il risultato di un calcolo di pericolosità sismica può essere rappresentato da uno spettro di risposta



Da Faccioli e Paolucci (2005)

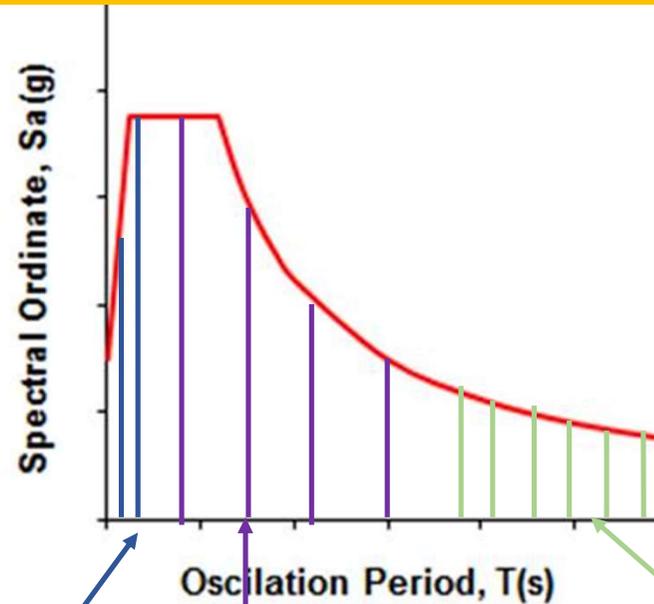
Spettro di risposta di accelerazione

Dominio della frequenza

Diverse strutture hanno diverse frequenze proprie

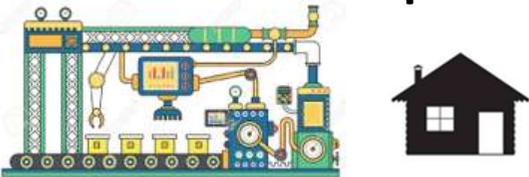
Un'approssimazione è

$T = 0.1s * \text{numero di piani}$



Se la frequenza della struttura è nota, la risposta di picco della struttura (semplificata) si può stimare dal valore dello spettro di risposta alla frequenza di risonanza.

Corti periodi



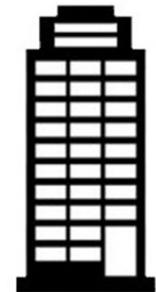
Edifici bassi, macchinari

Periodi intermedi



Edifici ordinari

Lunghi periodi



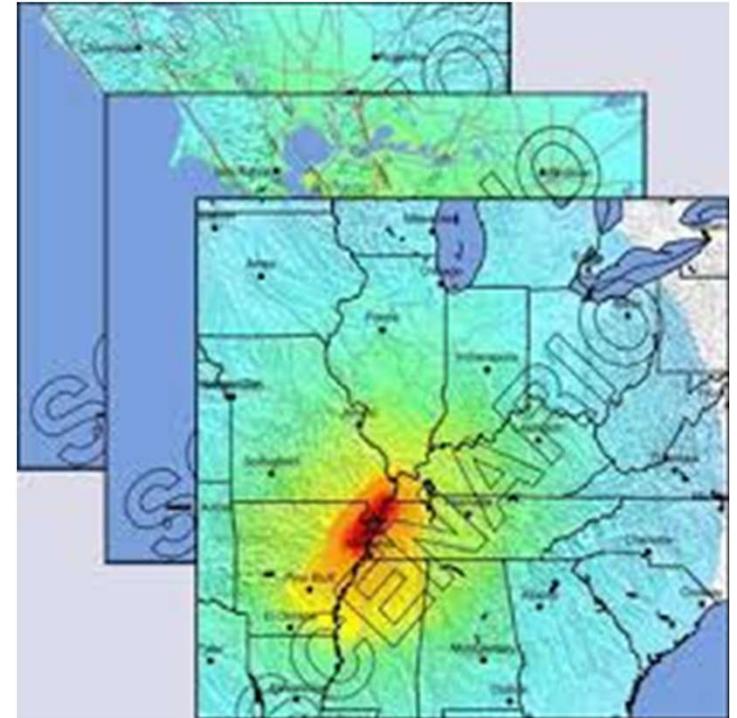
Edifici alti e ponti

Misure di intensità per problemi specifici

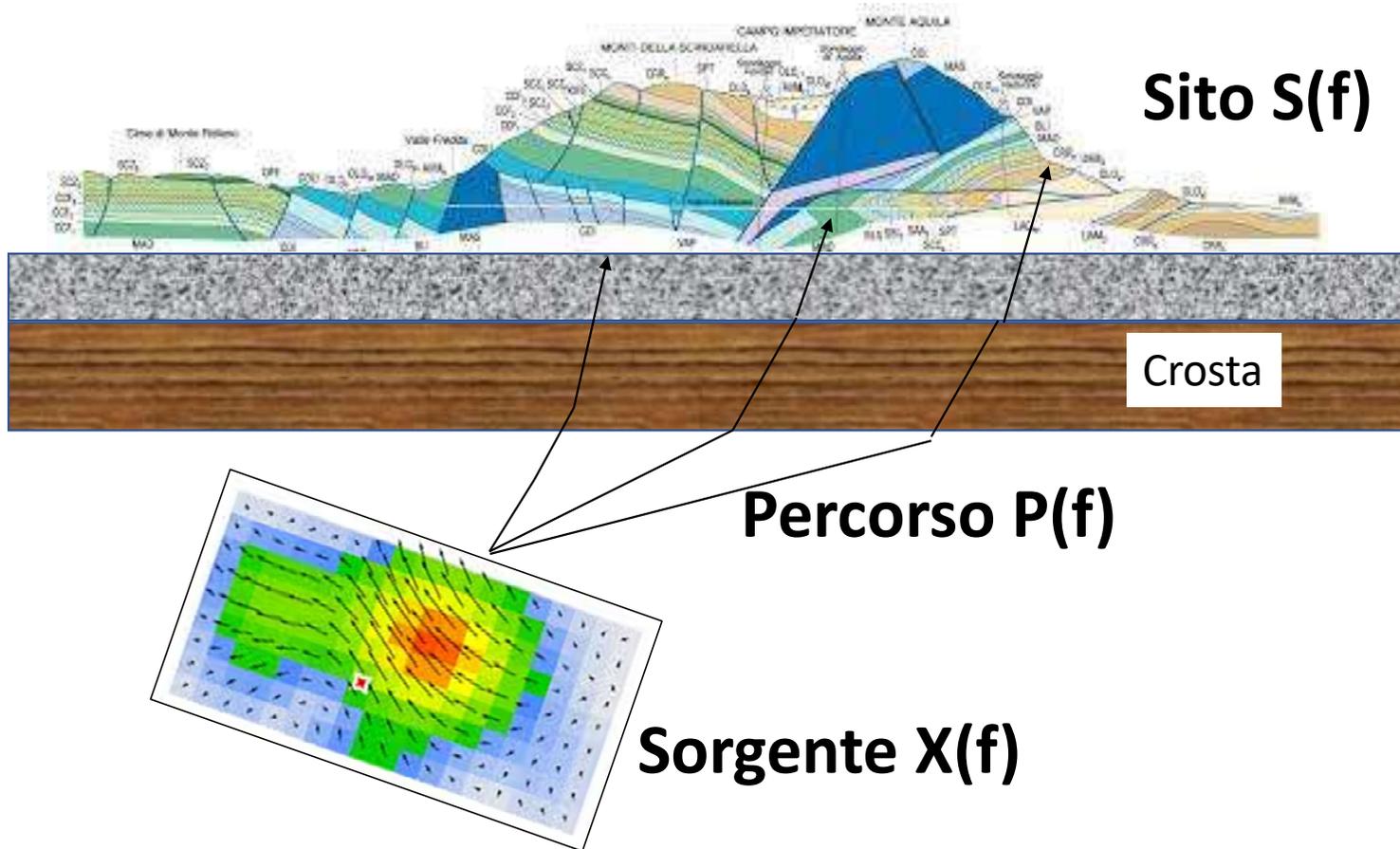
- **PGA**: valutazione semplificata della liquefazione e di altri problemi geotecnici (e.g., Idriss and Boulanger, 2008);
- **PGV**: deformazione di strutture interrato o infrastrutture soggette a transienti dello spostamento del suolo (e.g., Jeon and O'Rourke, 2005);
- **SA(T)**: usata in applicazioni di ingegneria strutturale, dove il periodo T identifica il primo modo di vibrazione della struttura (e.g., Shome et al., 1998);
- **Significant duration**: quantificazione degli effetti dello scuotimento prolungato sulla risposta delle strutture (e.g., Hancock and Bommer, 2006)
- **Arias Intensity**: spostamento delle frane sismoindotte (e.g., Bray and Travasarou, 2007)
- **CAV**: innesco della liquefazione (e.g., Kramer and Mitchell, 2006)

La pericolosità sismica: stima del moto del suolo

- Il concetto più intuitivo di pericolosità sismica è quello di **scenario**
- Si ipotizza un **terremoto** e si stima lo **scuotimento del terreno** ad esso associato
- Generalmente si cerca di simulare il caso peggiore



Cosa contribuisce al moto del suolo

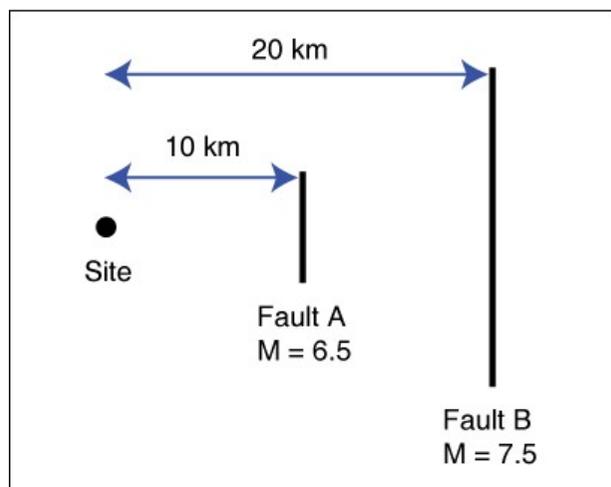


Il moto del suolo è dato dalla convoluzione dai termini di **sorgente**, **attenuazione** e **sito**

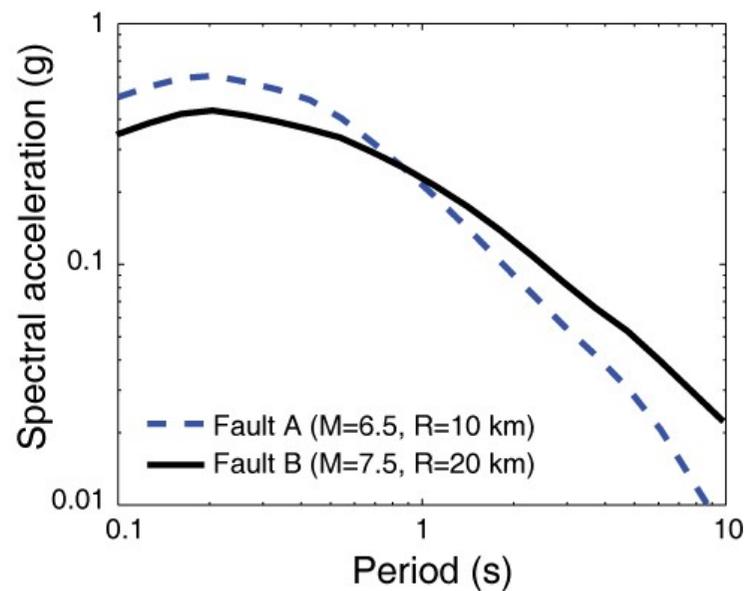
Maximum Considered Earthquake

- Si cerca perciò di identificare un terremoto ragionevolmente grande (storicamente “**Maximum Credible Earthquake,**” o MCE, più recentemente “**Maximum Considered Earthquake**”)
- Ci sono due punti da considerare:
 - 1) Il moto del suolo associato al MCE potrebbe non essere il caso peggiore;
 - 2) la determinazione dello scuotimento è molto sensibile alle ipotesi sulla magnitudo dello scenario e sull'intensità del moto del suolo.

Ma... qual è il caso peggiore?



(a)



(b)

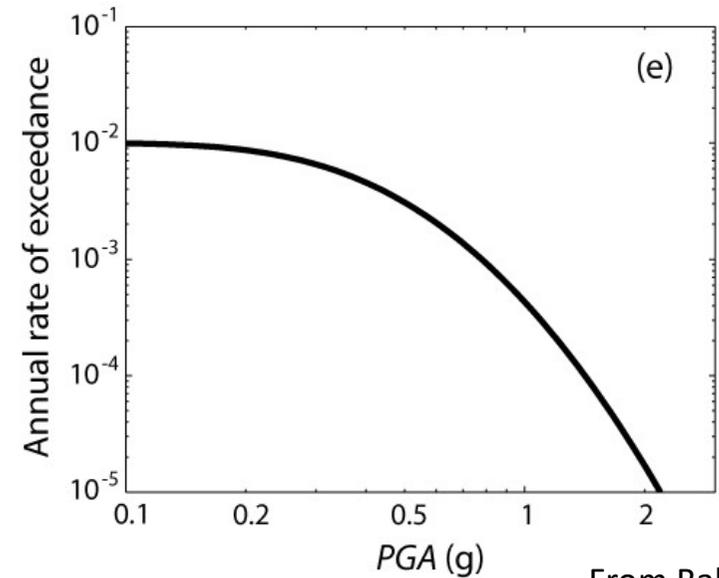
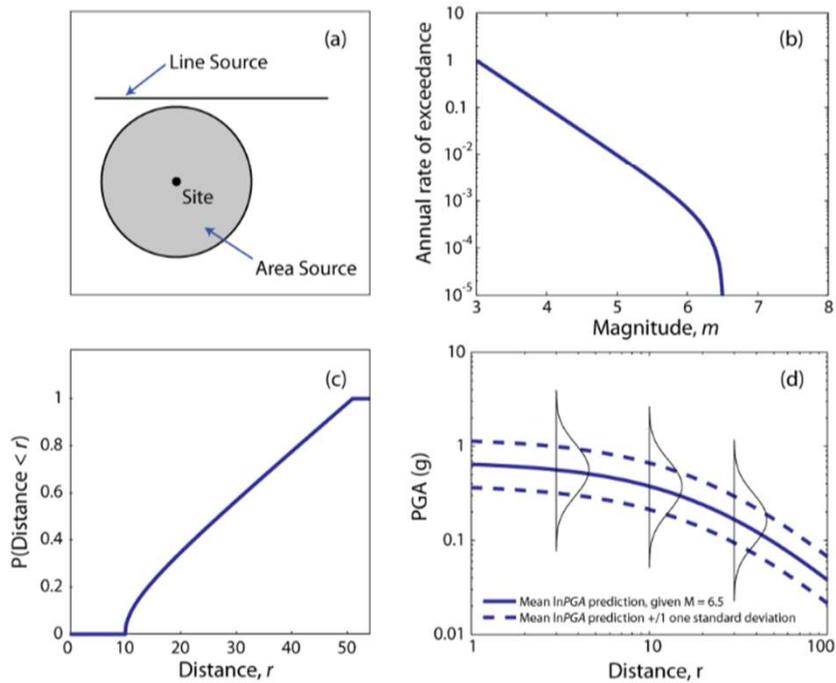
- Un terremoto di magnitudo moderata può produrre accelerazioni spettrali maggiori di un evento di magnitudo più elevata.
- Qual è il caso peggiore?

Approccio probabilistico

Quasi tutte le attività che implicano decisioni o assunzioni di rischio implicano il concetto di probabilità. *L'approccio probabilistico non è uno strumento matematico per spiegare la fisica del problema, ma:*

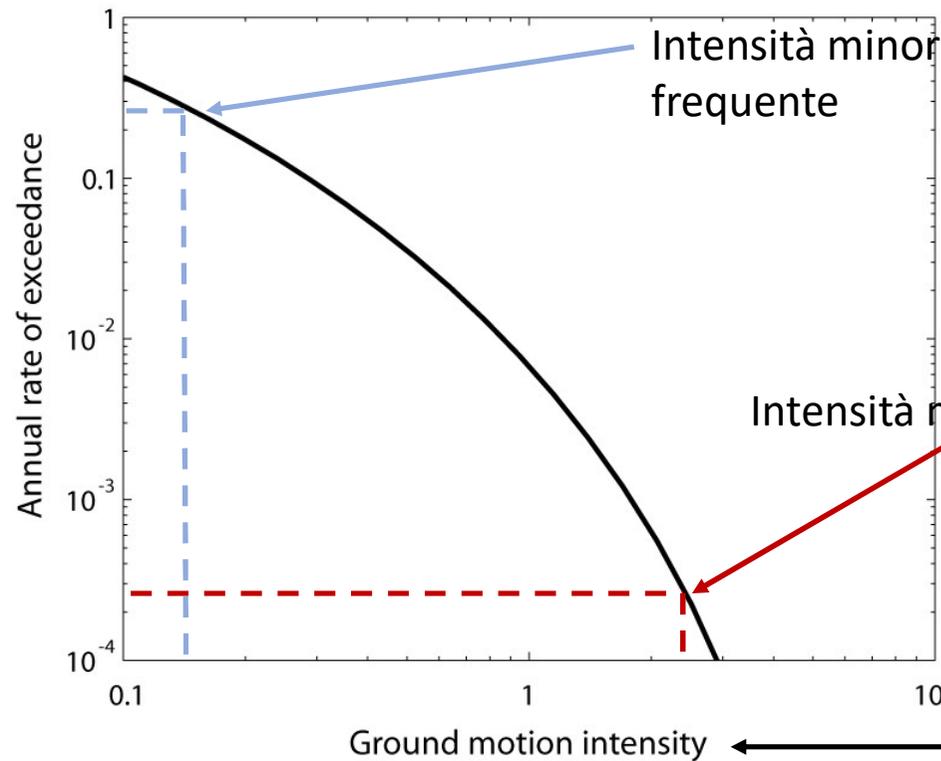
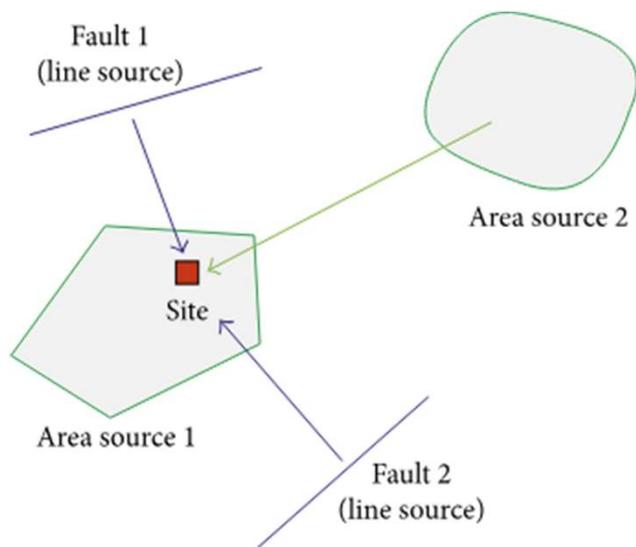
- permette l'introduzione delle incertezze, dato che non tutti i modelli considerati nel calcolo possono essere accurati
- permette di combinare più sorgenti di rischio/pericolosità calcolate in modo probabilistico
- mette a disposizione i mezzi per valutare l'impatto dei diversi modelli e delle diverse scelte
- **Il risultato non è un singolo valore di scuotimento, ma una distribuzione di valori per un sito, espresso in termini di frequenza annuale di eccedenza (o probabilità) di un valore di scuotimento**

Componenti della pericolosità sismica probabilistica



From Baker, 2008

Curva di pericolosità



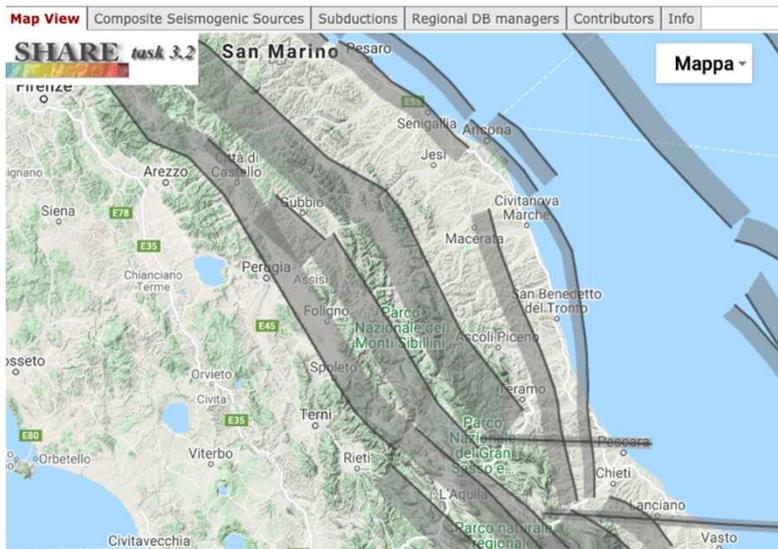
Intensità minore più frequente

Intensità maggiore rara

Intensità macrosismica, PGA, accelerazione spettrale, ecc

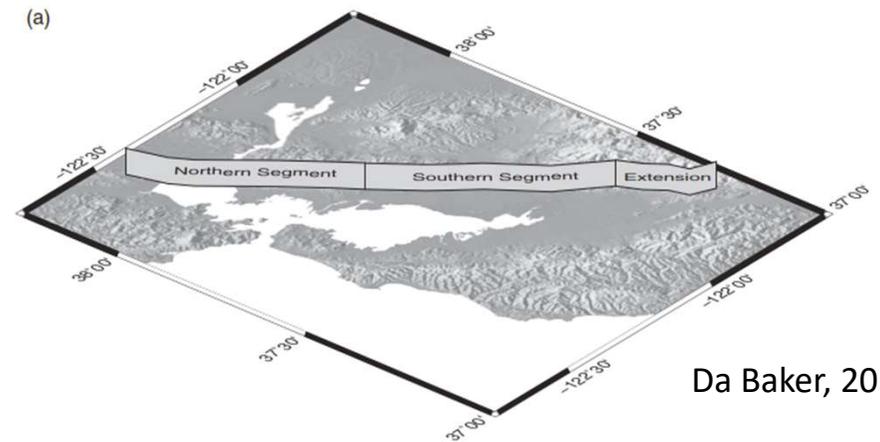
Input: sorgenti sismiche

http://diss.rm.ingv.it/share-edsf/SHARE_WP3.2_Database.html



Aree: Le singole faglie non sono sempre conosciute, e per questo le sorgenti sono spesso approssimate come sorgenti areali, capaci cioè di generare un terremoto in ogni loro punto.

Sismicità di background: zone non associabili a faglie o aree sismogenetiche, ma che possono generare terremoti



Da Baker, 2020

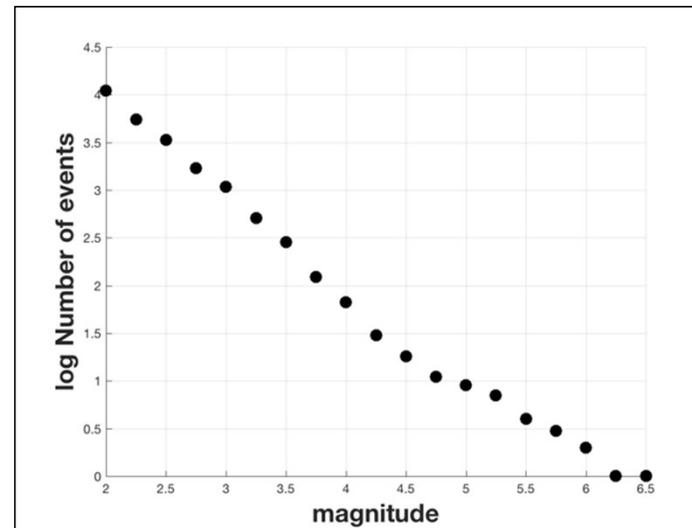
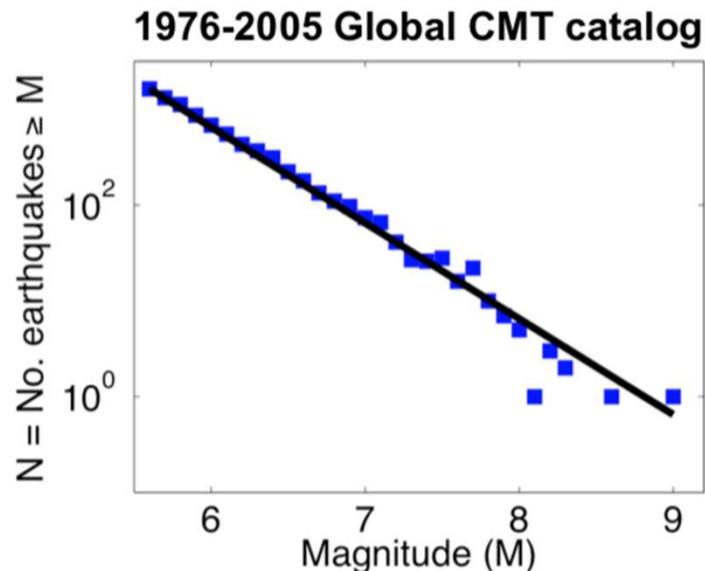
Faglie: uno o più segmenti (in 3D) che possono essere associati a rotture caratteristiche

La relazioni di scala empiriche (es. Wells e Coppersmith, 1984) sono equazioni che legano la magnitudo di un terremoto alle dimensioni di una sorgente

La frequenza dei terremoti (approccio basato sulla sismicità del passato)

I terremoti hanno una natura stocastica (cioè il loro comportamento è irregolare) ma..

- Il numero di terremoti in un intervallo di tempo ha una tendenza
- I terremoti forti sono più rari dei terremoti deboli e seguono una legge di potenza (legge di “Gutenberg - Richter”); questo ci da informazione sulla probabilità associata ad ogni magnitudo



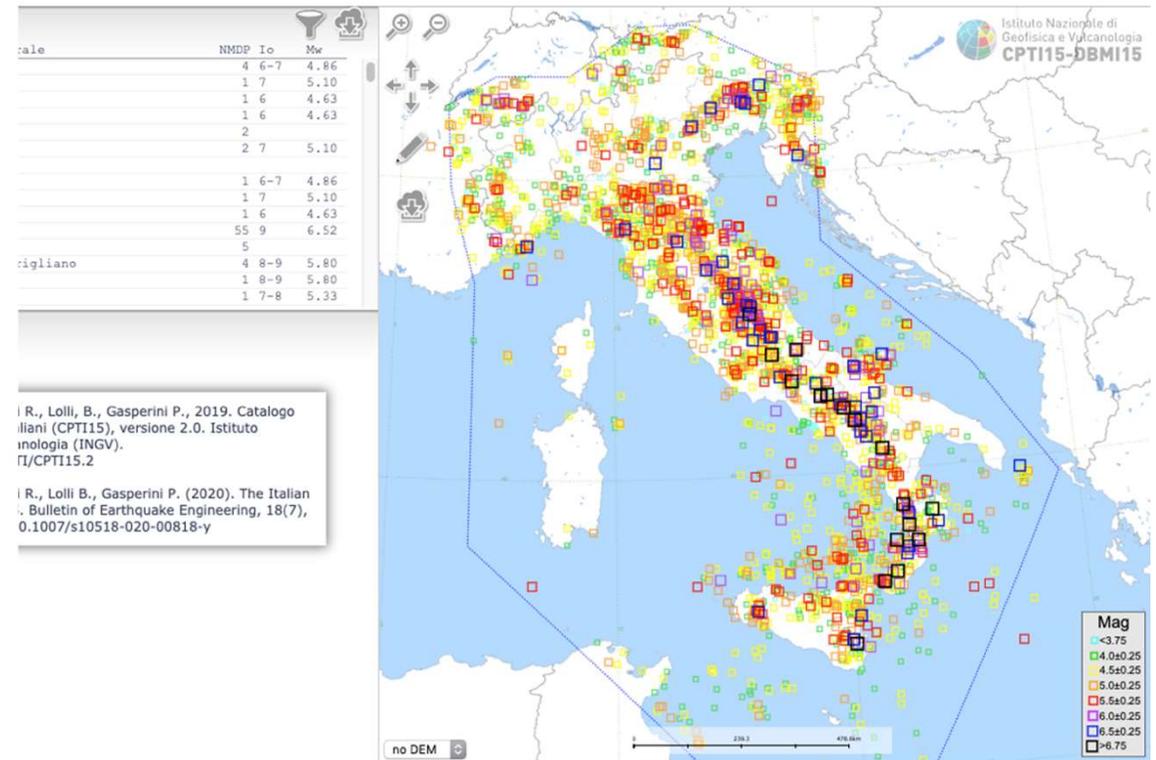
Numero di eventi
in funzione della
magnitudo in Italia
centrale (2016-
2020)

Geologia + catalogo = modello di sismicità

ACTIVE FAULT SOURCES OF ITALY

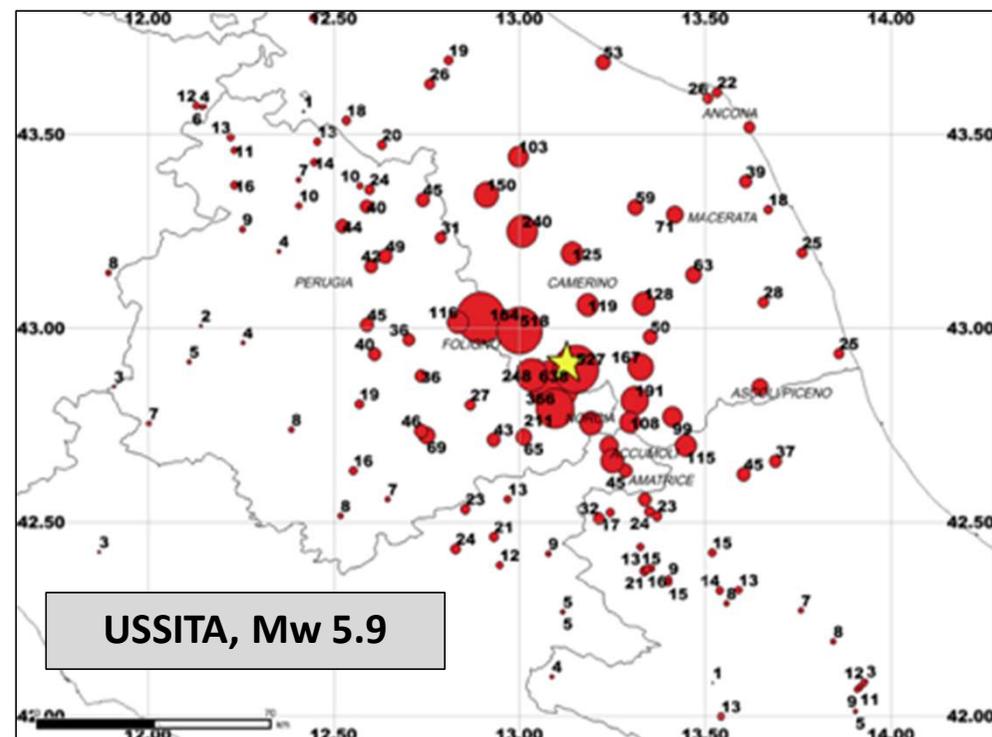
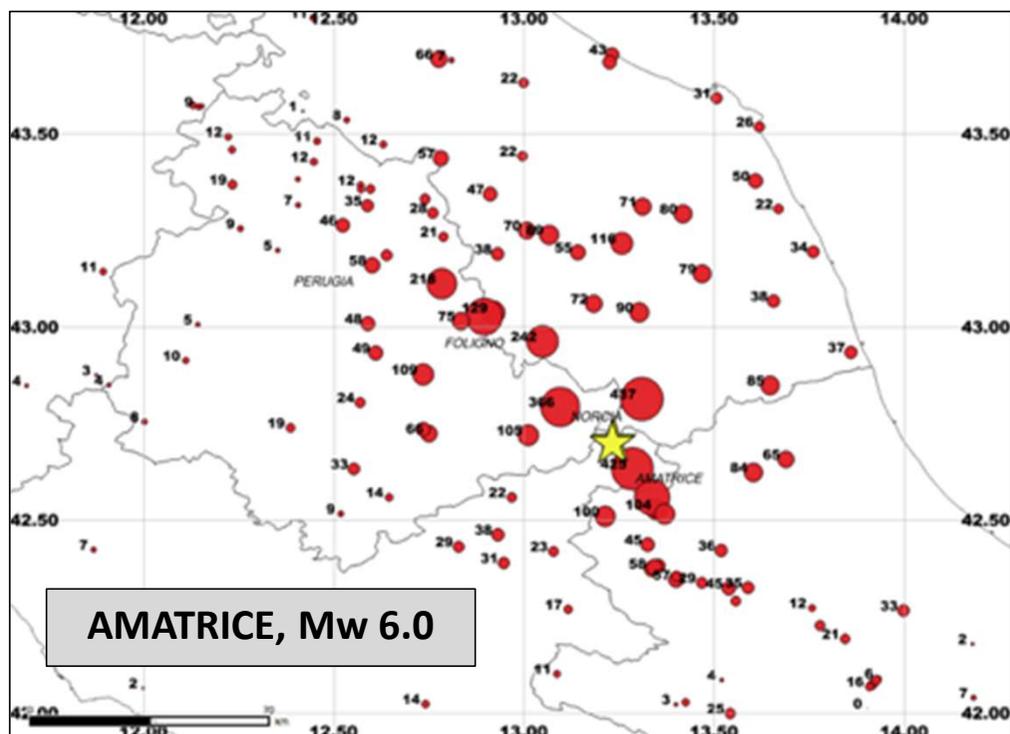


N.B.: esistono decine di modelli di sismicità per l'Italia!



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

Input: equazioni predittive del moto del suolo



PGA registrate durante il terremoto di Amatrice (24 Agosto 2016) e Ussita (26 Ottobre 2016)
La grandezza dei cerchi rossi è proporzionale alle PGA

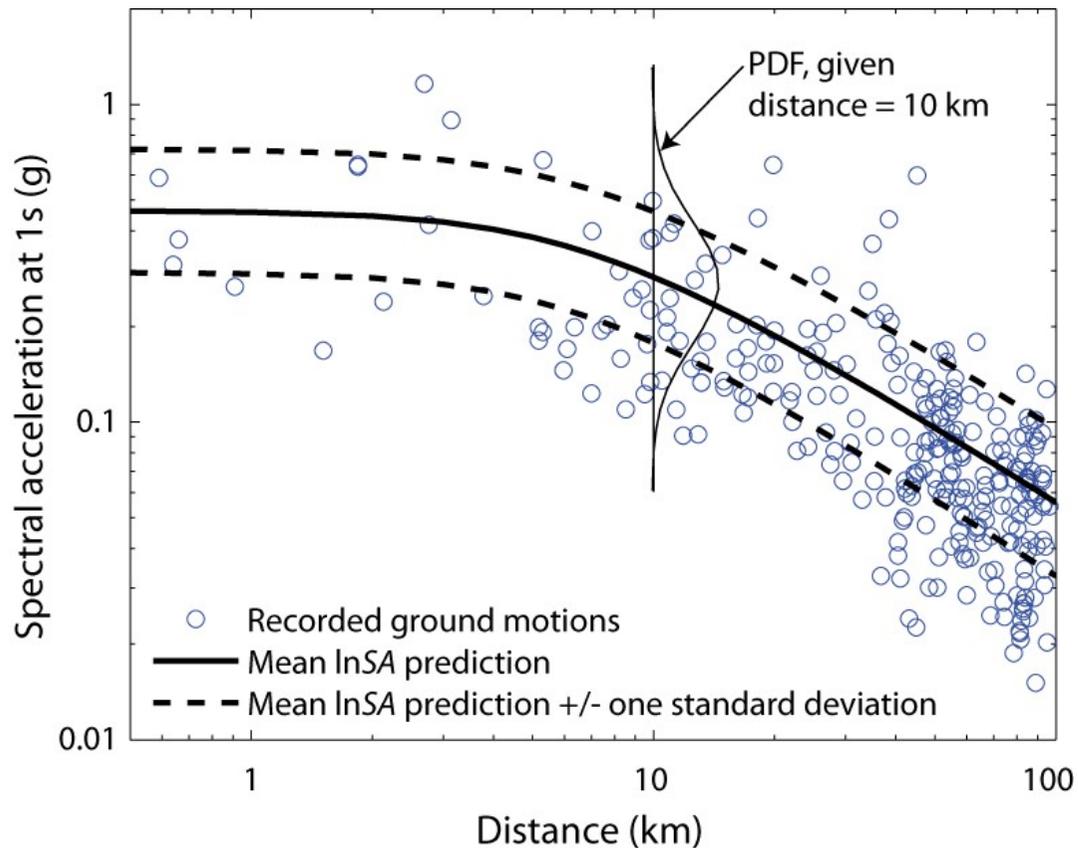
Equazioni predittive del moto del suolo (GMPE)

Lo scopo primario di un'equazione predittiva del moto del suolo è quello di predire una misura di intensità (PGA, PGV, ordinate dello spettro di risposta, ordinate dello spettro di Fourier)

Si usano le registrazioni dei terremoti del passato per derivare (con tecniche statistiche) equazioni empiriche che predicano il moto del suolo di terremoti futuri. **L'assunzione è che i terremoti del futuro genereranno "in media" lo stesso moto del suolo dei terremoti del passato.**

In generale viene predetta la media di un parametro e l'incertezza associata

Variabilità del moto del suolo



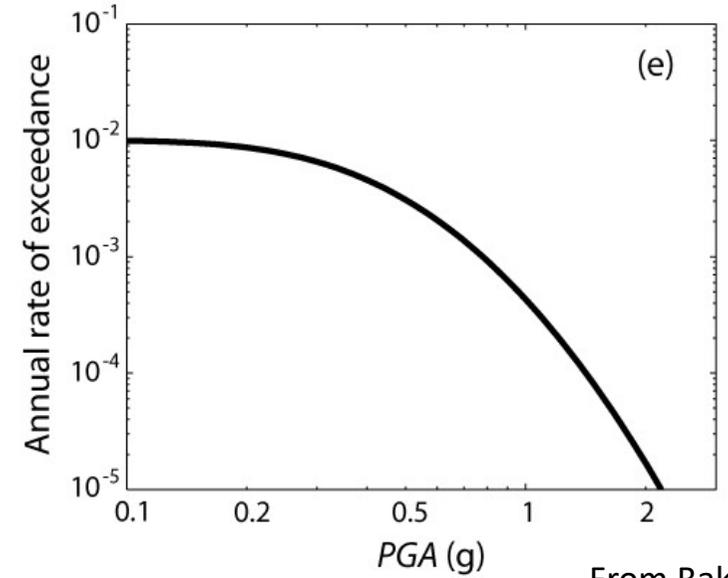
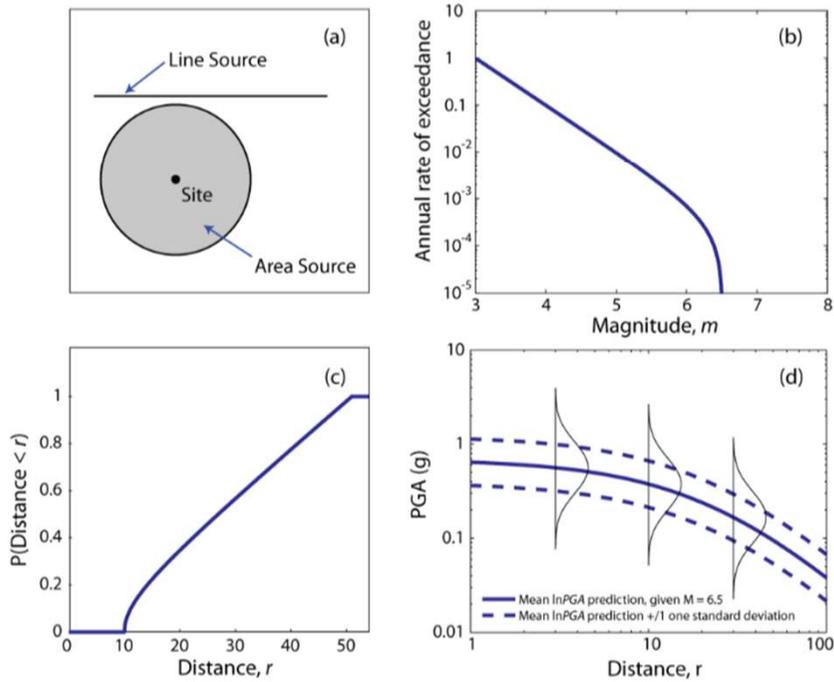
Da Baker, 2008

Le osservazioni mostrano che il moto del suolo è estremamente variabile a parità di magnitudo e distanza dalla sorgente

Dato che i dati si distribuiscono in modo normale, teoricamente non c'è un limite superiore all'ampiezza del moto del suolo

N.B.: esistono centinaia di leggi predittive del moto del suolo!

Componenti della pericolosità sismica probabilistica



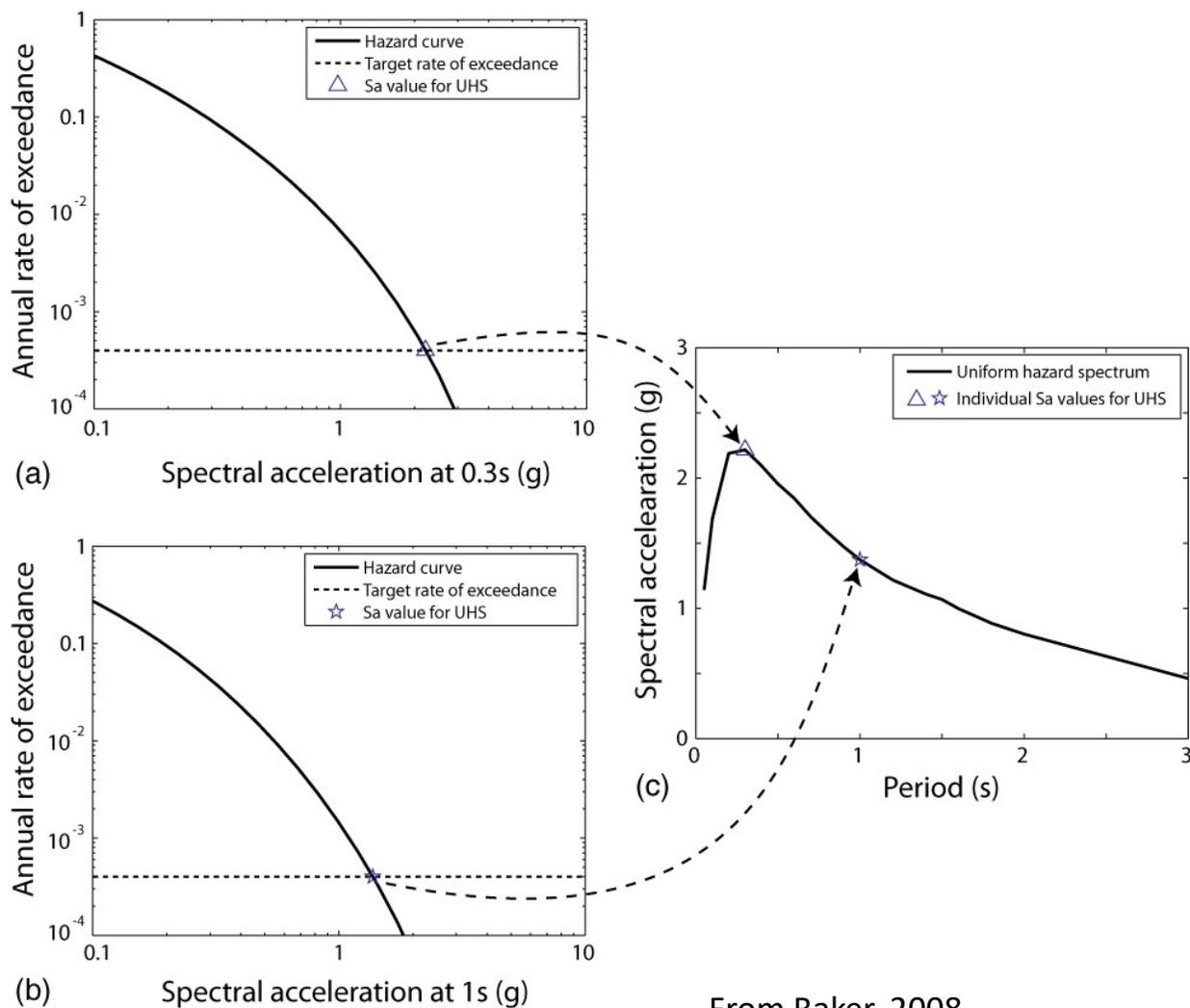
From Baker, 2008

$$P(IM > x) = \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} \underbrace{P(IM > x|m, r)}_{\text{GMPE}} \underbrace{f_M(m)}_{\text{Magnitudo}} \underbrace{f_R(r)}_{\text{Distanza}} dr dm$$

↓
Probabilità di eccedenza

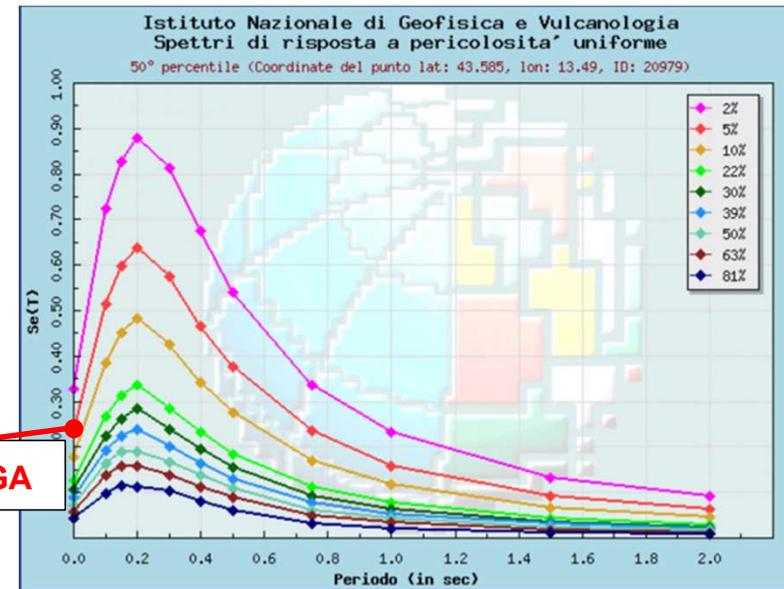
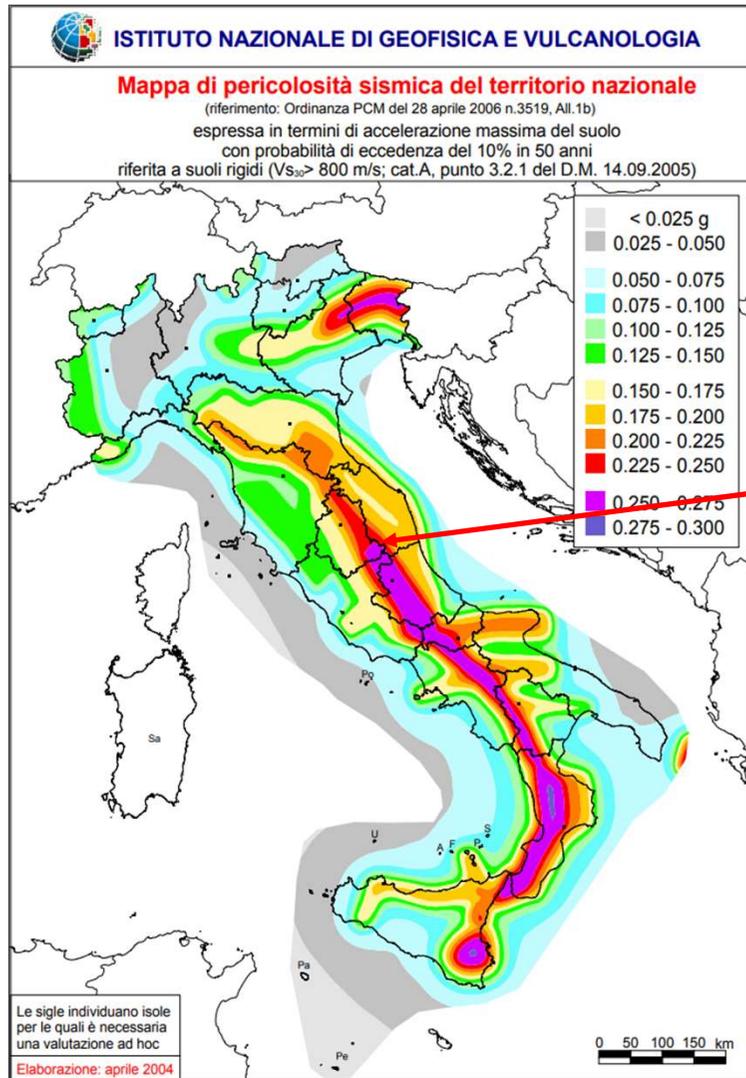
GMPE Magnitudo Distanza

Come si costruisce lo spettro a probabilità uniforme

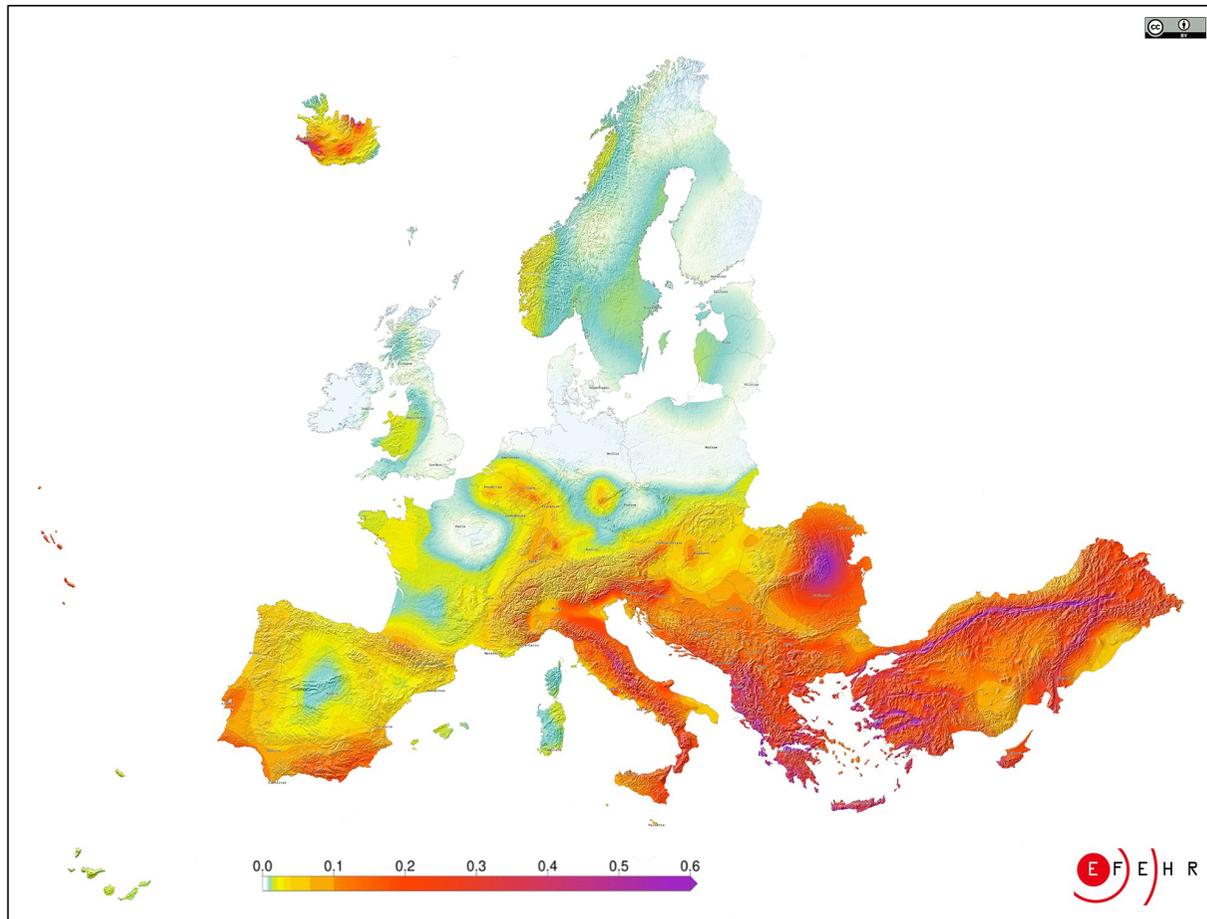


- Si effettua il calcolo della PSHA per le accelerazioni spettrali in un intervallo di periodi
- Per ogni periodo spettrale, dal grafico della curva di pericolosità, per una probabilità di eccedenza in un periodo di riferimento (es. 10% in 50 anni), si seleziona il valore del parametro di scuotimento corrispondente.
- L'insieme dei valori del parametro di scuotimento in funzione del periodo si definisce spettro a probabilità uniforme (**Uniform Hazard Spectrum, UHS**) poichè ogni ordinata spettrale ha la stessa frequenza di eccedenza
- Lo spettro UHS non ha alcun significato fisico

Mappa di Pericolosità Sismica nazionale (MPS04)



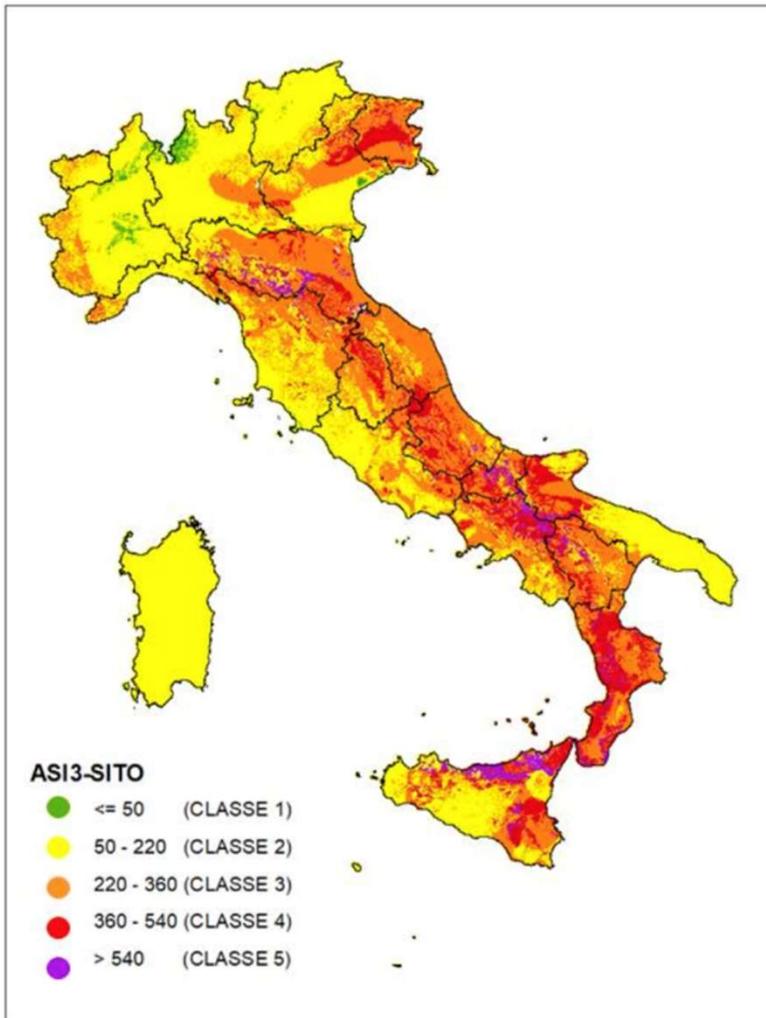
Carta di pericolosità sismica Europea



La mappa di pericolosità Europea (ESHM20, 2020) è stata sviluppata nell'ambito dell'infrastruttura di ricerca **EPOS** (European Plate Observing System) e viene distribuita e aggiornata dal consorzio **EFEHR**

<http://www.efehr.org/earthquake-hazard/hazard-map/>

Effetto di sito



Le carte di pericolosità sono calcolate assumendo che il moto del suolo avvenga su siti in roccia (si assume che la $V_{s,30} > 800$ m/s).

Per calcolare la pericolosità tenendo conto degli effetti del terreno bisogna introdurre effetti correttivi oppure calcolare la risposta del sito e combinarla con il valore di pericolosità su roccia

Grazie!

Lucia Luzi
lucia.luzi@ingv.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA