

Corso di aggiornamento

# **Evoluzione della normativa: quali effetti su progetto e verifica di edifici in cemento armato?**

Rimini, 27 febbraio 2018

Imola, 28 febbraio 2018

**Aurelio Ghersi**

2 - Pericolosità sismica

# Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto  
del Friuli (1976)  
parte il Progetto  
Finalizzato  
Geodinamica (CNR)

Partendo dallo studio  
geologico, dall'individuazione  
delle faglie, dalla ricorrenza  
degli eventi sismici e dalla  
attenuazione delle onde  
sismiche con la distanza si  
valuta la probabilità di avere  
assegnate accelerazioni in  
ciascun sito

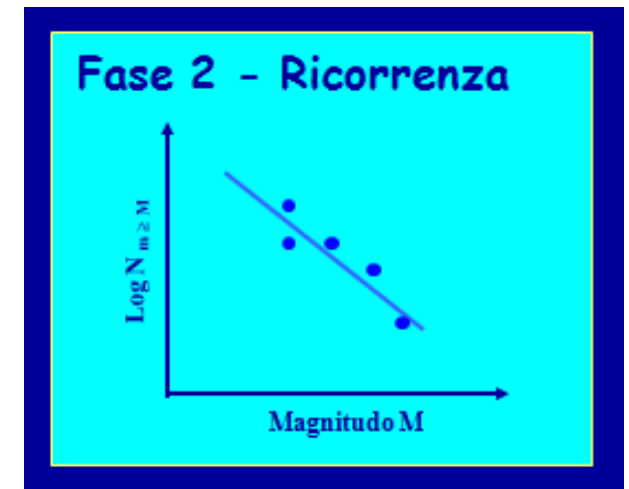


Individuazione delle  
faglie nelle zone  
circostanti il sito

# Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto  
del Friuli (1976)  
parte il Progetto  
Finalizzato  
Geodinamica (CNR)

Partendo dallo studio  
geologico, dall'individuazione  
delle faglie, dalla ricorrenza  
degli eventi sismici e dalla  
attenuazione delle onde  
sismiche con la distanza si  
valuta la probabilità di avere  
assegnate accelerazioni in  
ciascun sito



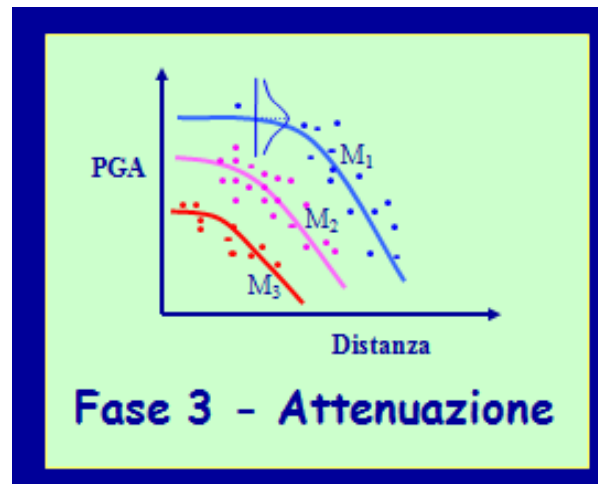
Individuazione degli  
eventi sismici che tali  
faglie possono  
provocare e della loro  
ricorrenza

# Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto  
del Friuli (1976)  
parte il Progetto  
Finalizzato  
Geodinamica (CNR)

Partendo dallo studio  
geologico, dall'individuazione  
delle faglie, dalla ricorrenza  
degli eventi sismici e dalla  
attenuazione delle onde  
sismiche con la distanza si  
valuta la probabilità di avere  
assegnate accelerazioni in  
ciascun sito

Valutazione della  
trasmissione delle  
onde sismiche e della  
loro attenuazione  
arrivando dalla faglia  
al sito in esame

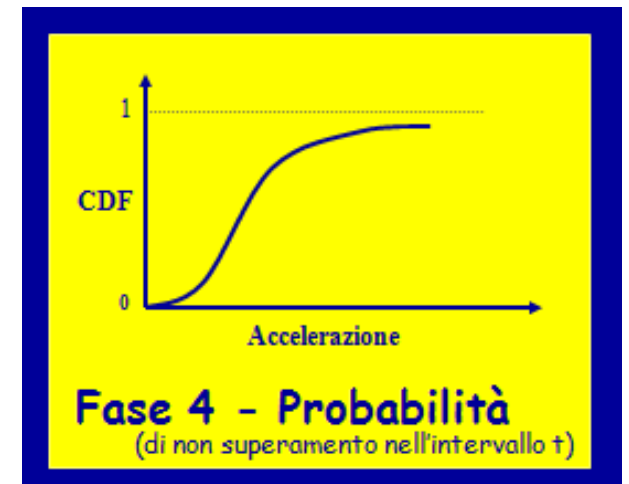


# Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto  
del Friuli (1976)  
parte il Progetto  
Finalizzato  
Geodinamica (CNR)

Valutazione della  
probabilità di avere  
assegnate  
accelerazioni nel sito  
in esame

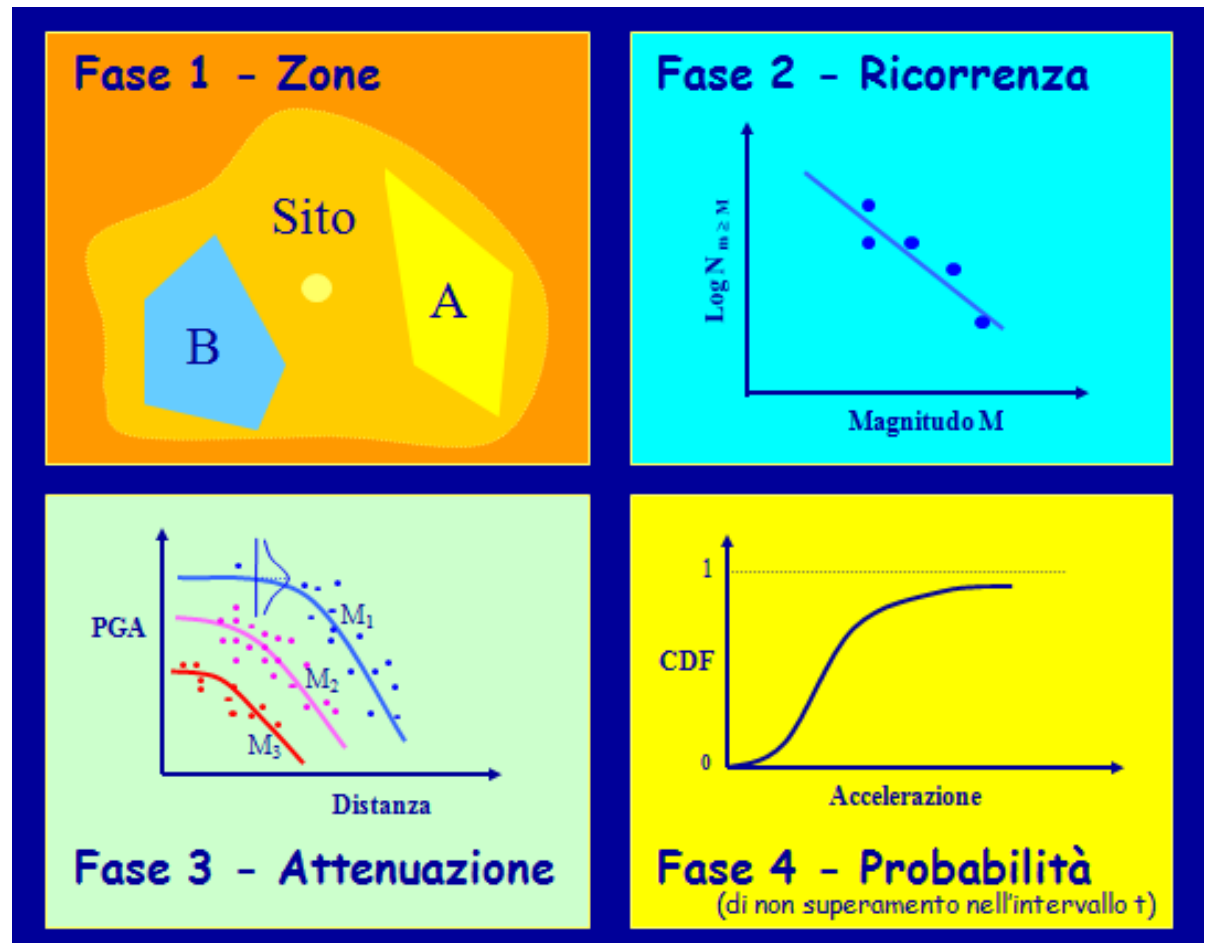
Partendo dallo studio  
geologico, dall'individuazione  
delle faglie, dalla ricorrenza  
degli eventi sismici e dalla  
attenuazione delle onde  
sismiche con la distanza si  
valuta la probabilità di avere  
assegnate accelerazioni in  
ciascun sito



# Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto  
del Friuli (1976)  
parte il Progetto  
Finalizzato  
Geodinamica (CNR)

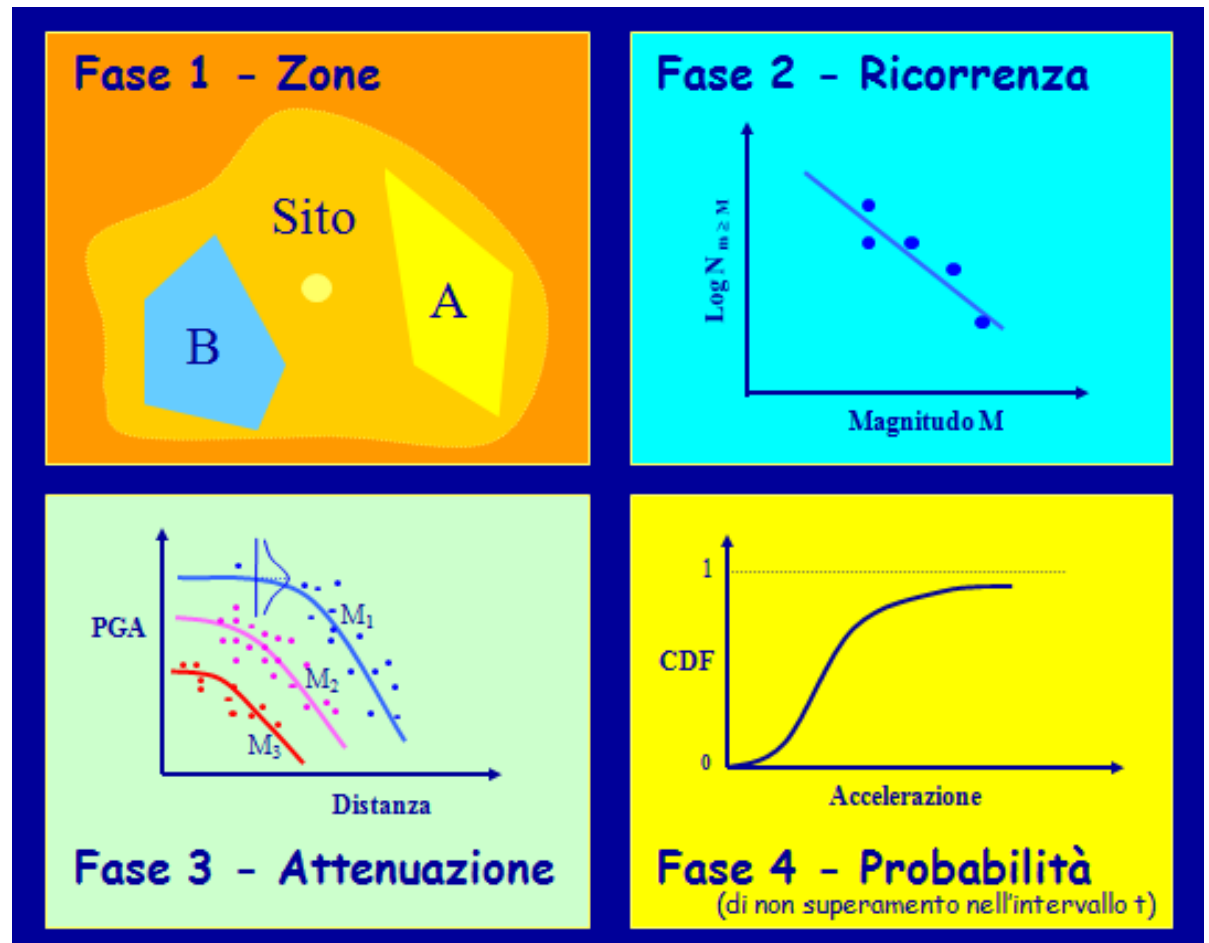
Partendo dallo studio  
geologico, dall'individuazione  
delle faglie, dalla ricorrenza  
degli eventi sismici e dalla  
attenuazione delle onde  
sismiche con la distanza si  
valuta la probabilità di avere  
assegnate accelerazioni in  
ciascun sito



# Terremoti previsti per un determinato sito

Dopo il terremoto  
del Friuli (1976)  
parte il Progetto  
Finalizzato  
Geodinamica (CNR)

In anni più recenti si  
è avviato in Europa il  
Progetto SHARE  
(Seismic Hazard  
Harmonization in  
Europe)



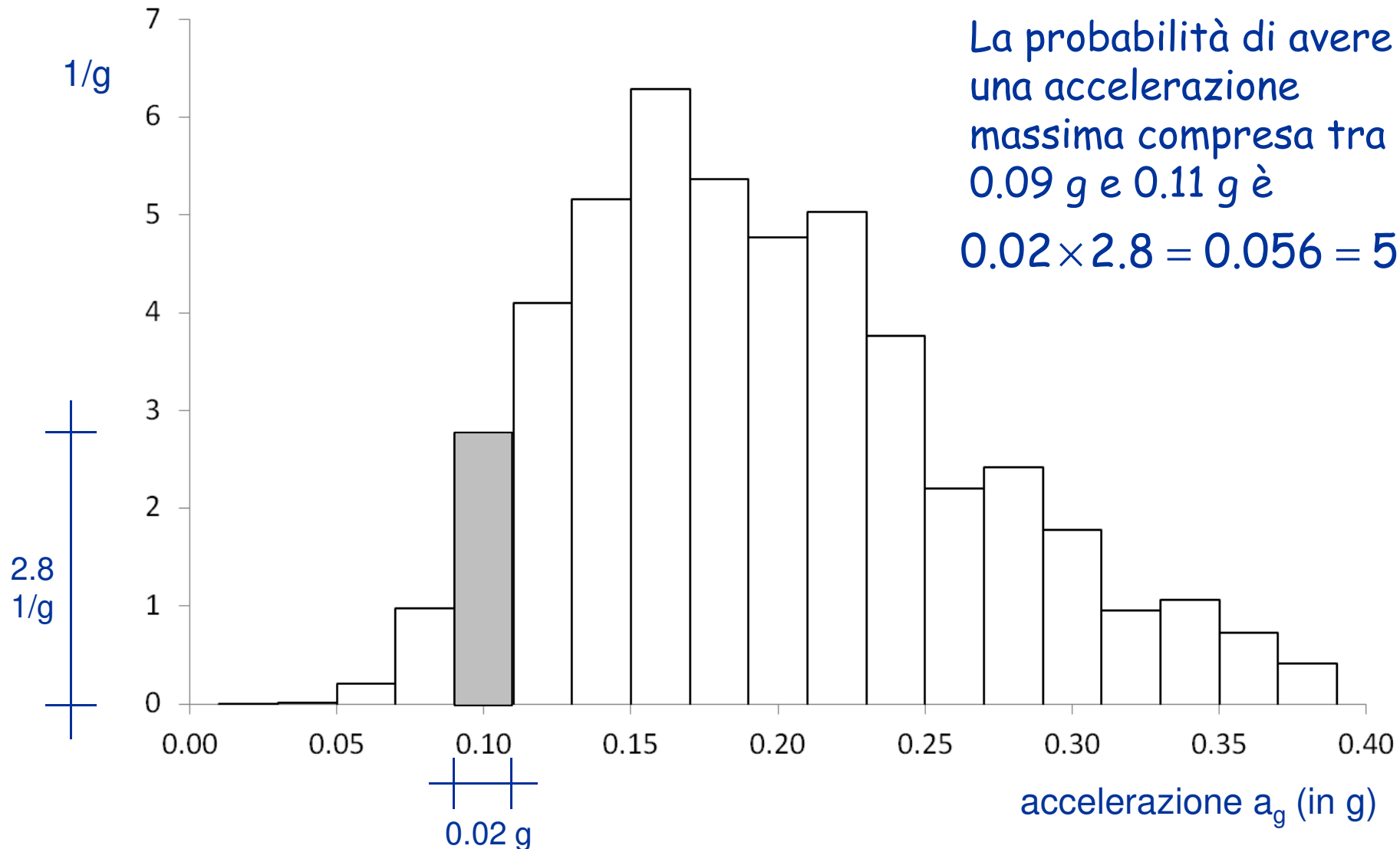
# Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Gli studi svolti consentono di valutare quale sarà l'accelerazione massima che si può avere in un sito in un assegnato intervallo di tempo
  - Ad esempio in 100 anni
- I risultati non sono deterministici, ma devono essere analizzati in maniera probabilistica
  - Ad esempio si possono esaminare tanti intervalli e valutare qual è l'accelerazione massima  $a_g$  in ciascuno di essi
  - Questi valori, raggruppati in intervalli di  $a_g$ , possono essere rappresentati con un istogramma (distribuzione di frequenza)

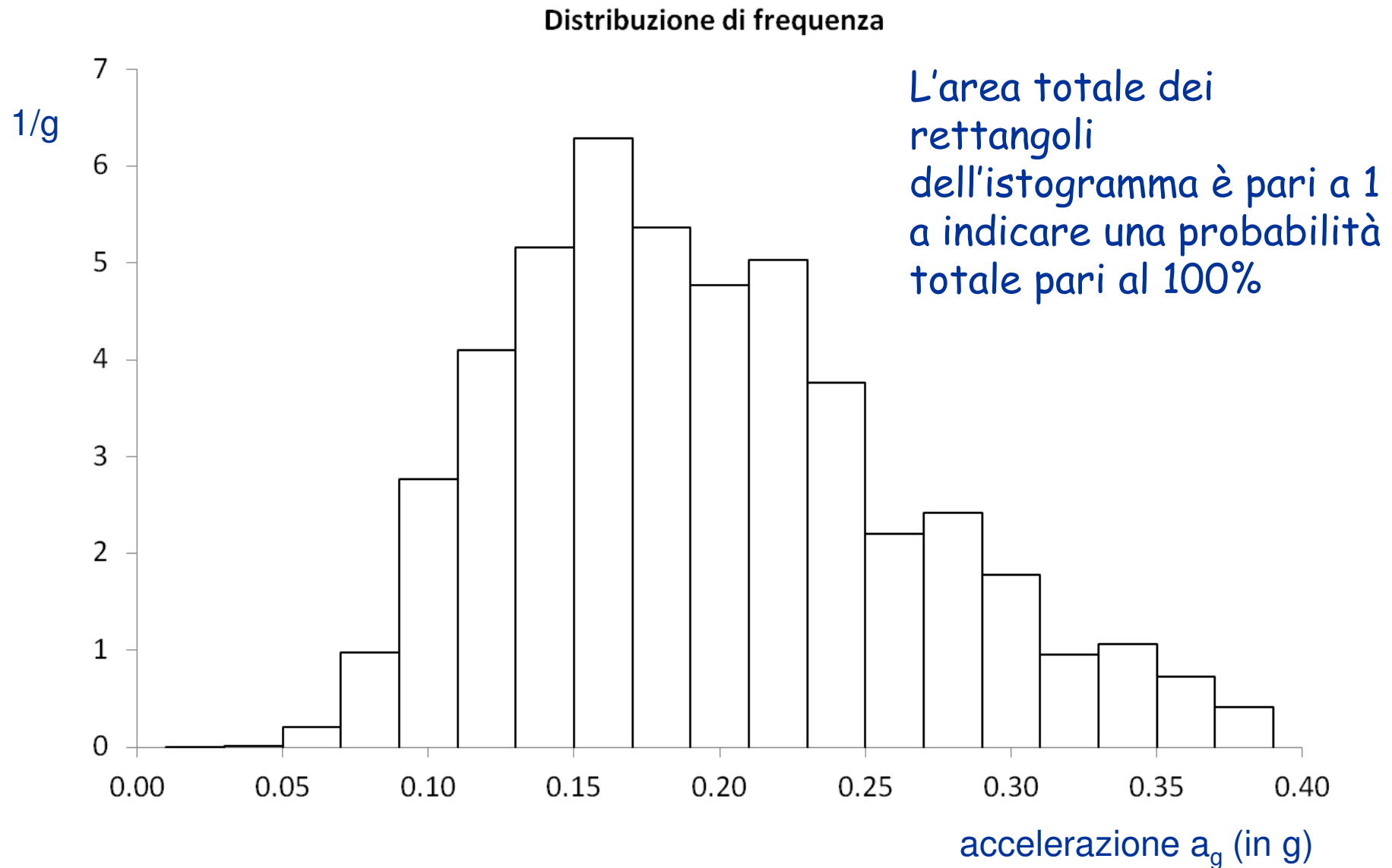


# Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

Distribuzione di frequenza



# Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?



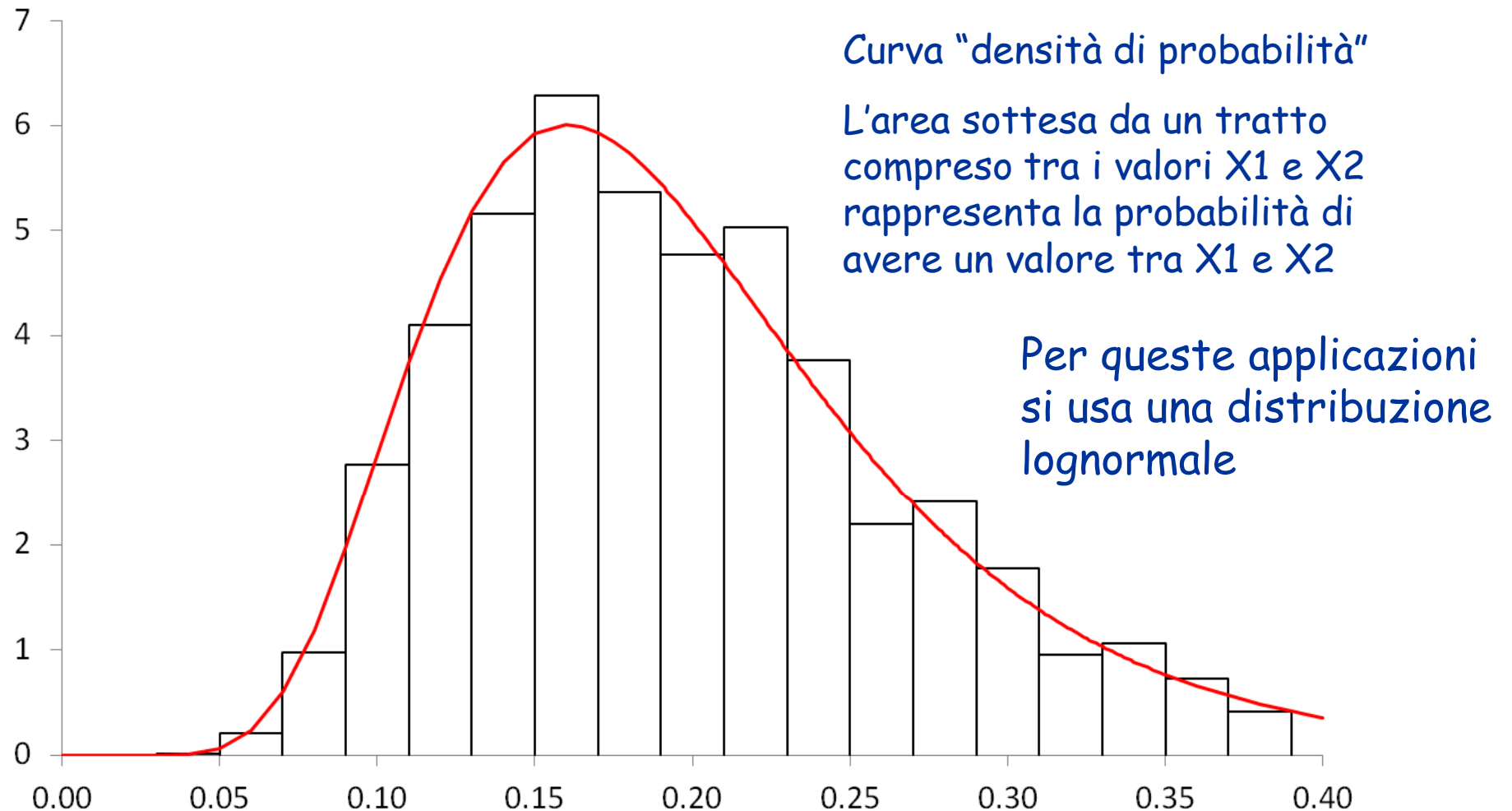
# Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Quando il numero di valori aumenta si può ridurre l'ampiezza degli intervalli, fino ad avere una curva continua (densità di probabilità)
- In genere si approssima la curva di densità di probabilità con una curva di equazione nota
  - Distribuzione normale o Gaussiana
  - Distribuzione lognormale

Bibliografia: Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang, Probability concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons

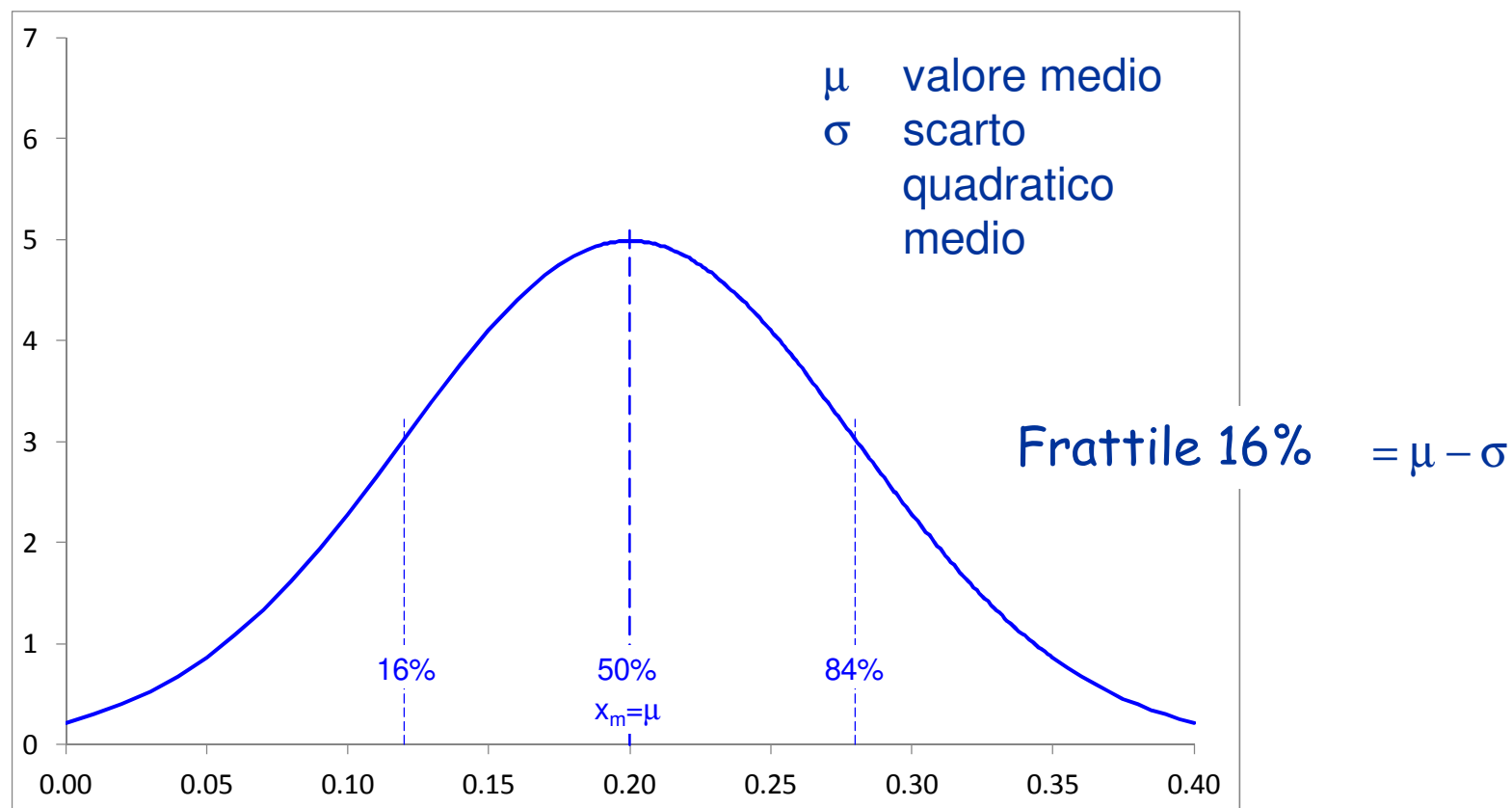
# Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

Distribuzione di frequenza e densità di probabilità (lognormale)



# Distribuzione normale o Gaussiana

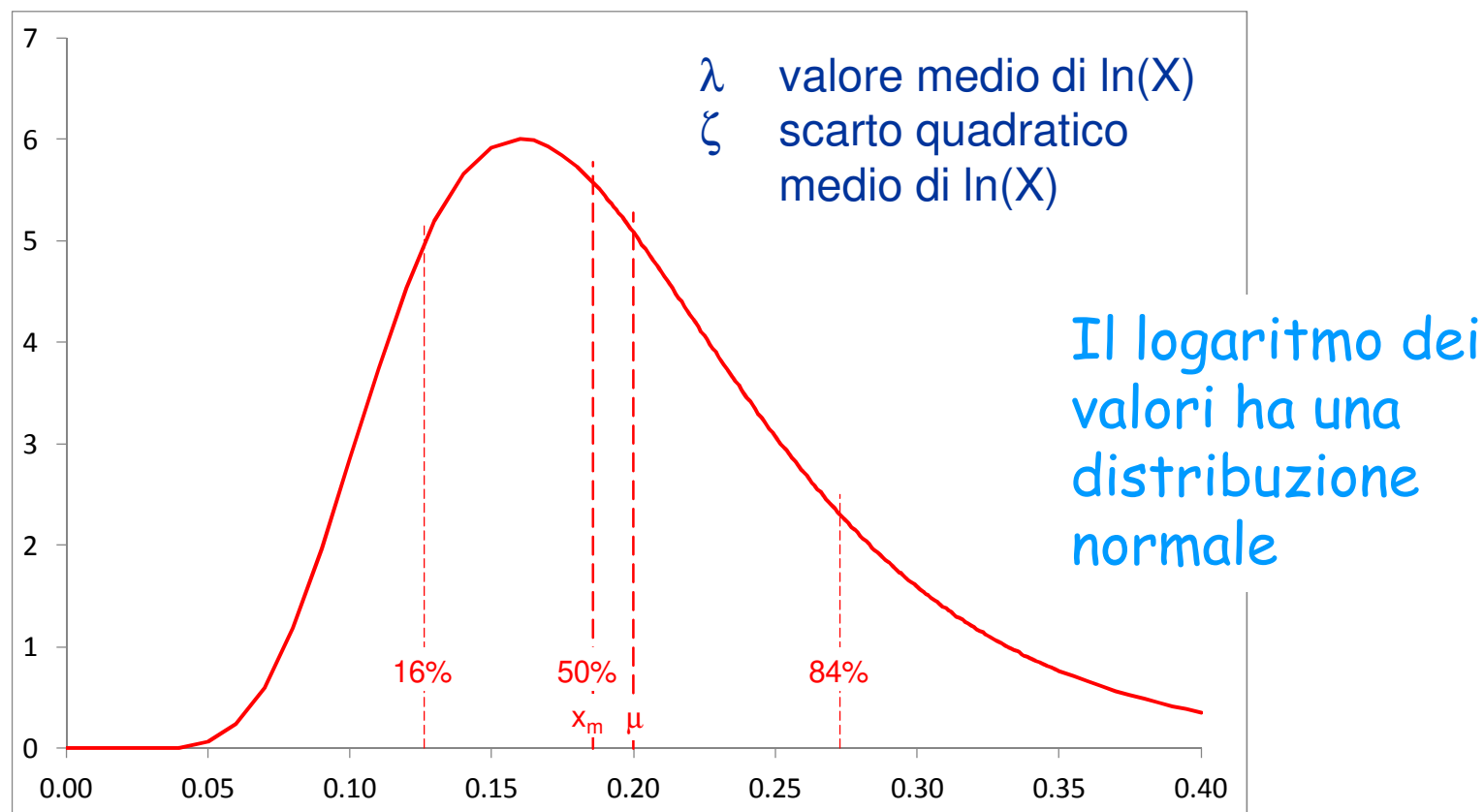
- Definita con l'equazione  $f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$



Distribuzione simmetrica rispetto al valore medio  $\mu = \text{mediano } x_m$

# Distribuzione lognormale

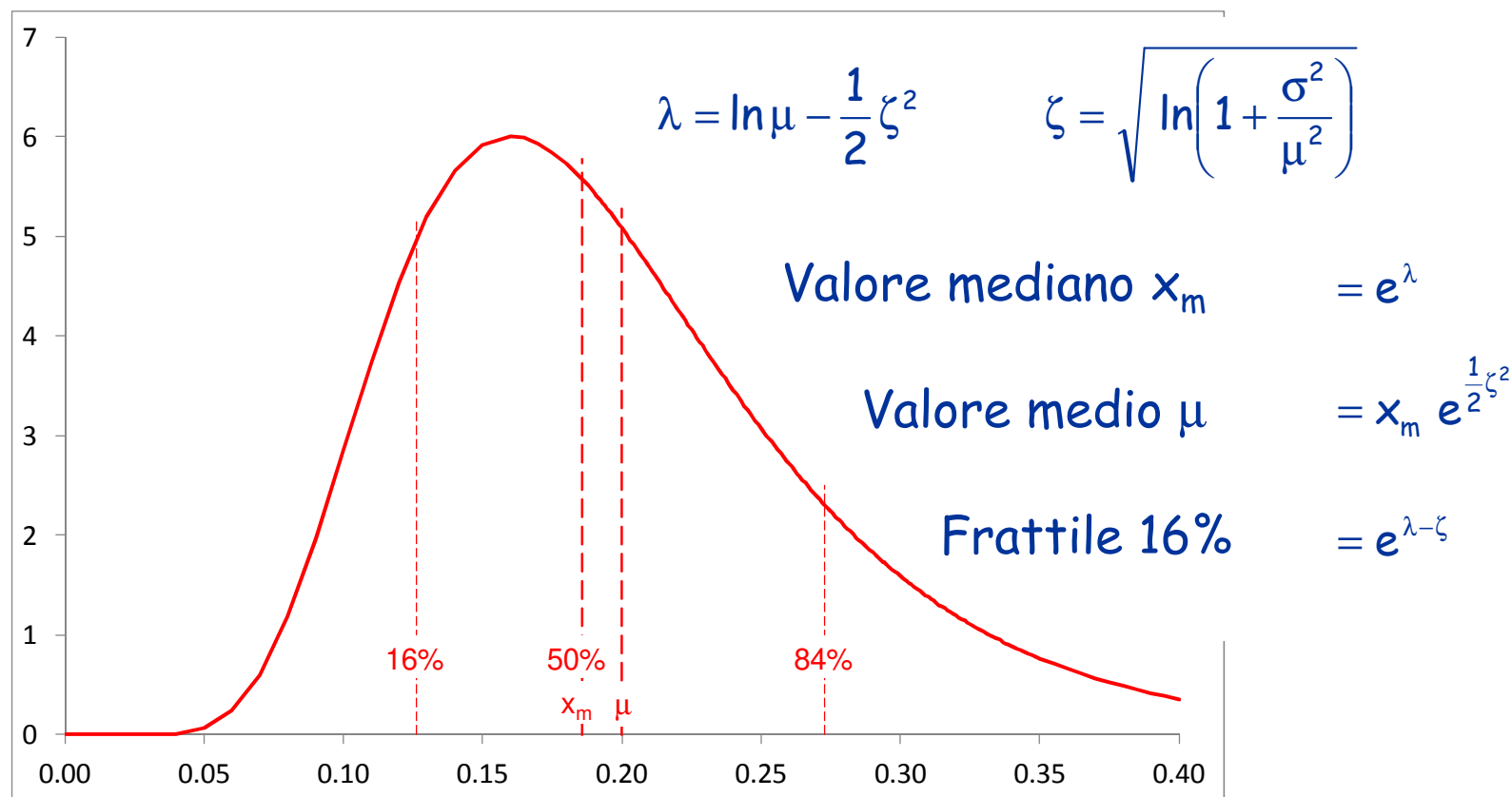
- Definita con l'equazione  $f_x(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2}$



Distribuzione non simmetrica; valore medio  $\mu \neq$  mediano  $x_m$

# Distribuzione lognormale

- Definita con l'equazione  $f_x(x) = \frac{1}{\zeta x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln x - \lambda}{\zeta} \right)^2}$



Distribuzione non simmetrica; valore medio  $\mu \neq$  mediano  $x_m$

# Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- I valori sono stati ottenuti dal Progetto Finalizzato Geodinamica
- I risultati sono riportati nel sito INGV ed io li ho raccolti nel file Pericolosità e spettri
  - Sono riportati per oltre 10000 siti il valore mediano ed i frattili 16% e 84%, per 9 diversi intervalli di tempo
  - È possibile calcolare i valori per un qualsiasi sito, diverso da quelli studiati, mediante interpolazione



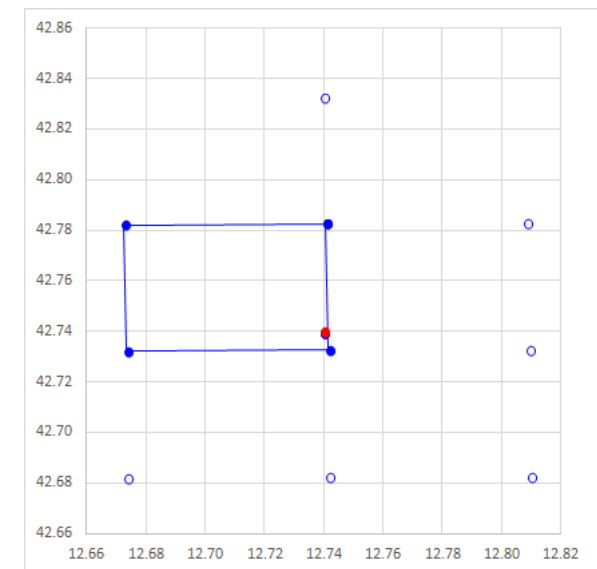
# Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Ad esempio:
  - Per un sito noto (assegnare l'ID di riferimento, per Spoleto ID 24742)

	Tipo ricerca	Cerca ID		
	indicare ID			
	24742			

- Per un sito generico (assegnare latitudine e longitudine, per Spoleto Villa Redenta Lat. 42.74 Lon. 12.74)

	Tipo ricerca	Cerca Lat. Lon.		
		indicare		
		Lat.	Lon.	
		42.74	12.74	
		ID	peso	
		24520	0.129	
		24742	0.720	
		24741	0.082	
		24519	0.069	



File Excel Pericolosità e spettri

# Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

Nel sito INGV  
i valori sono  
raggruppati per  $\Delta t$

$\Delta t = 475$  anni

punto di  
riferimento  
(Spoleto)

Nel file Excel  
vengono mostrati  
per sito o ID

$\Delta t$	fratt. 50%	fratt. 16%	fratt. 84%
30	0.0691	0.0543	0.0729
50	0.0865	0.0727	0.0917
72	0.1026	0.0877	0.1072
101	0.1191	0.1032	0.1250
140	0.1361	0.1195	0.1435
201	0.1568	0.1391	0.1669
475	0.2156	0.1928	0.2344
975	0.2767	0.2445	0.3009
2475	0.3719	0.3210	0.4080

id	lon	lat	ag	84perc	16perc
24735	12.2649	42.7284	0.1504	0.1734	0.1361
24736	12.3330	42.7291	0.1527	0.1761	0.1384
24737	12.4010	42.7298	0.1552	0.1769	0.1400
24738	12.4691	42.7304	0.1590	0.1777	0.1427
24739	12.5372	42.7310	0.1654	0.1790	0.1483
24740	12.6052	42.7315	0.1760	0.1882	0.1586
24741	12.6733	42.7320	0.1938	0.2060	0.1744
24742	12.7414	42.7325	0.2156	0.2344	0.1928
24743	12.8094	42.7329	0.2377	0.2547	0.2107
24744	12.8775	42.7333	0.2531	0.2743	0.2245
24745	12.9455	42.7336	0.2521	0.2792	0.2308
24746	13.0136	42.7339	0.2555	0.2820	0.2332
24747	13.0817	42.7342	0.2572	0.2835	0.2346
24748	13.1497	42.7344	0.2576	0.2838	0.2350
24749	13.2178	42.7346	0.2569	0.2831	0.2341
24750	13.2859	42.7348	0.2541	0.2797	0.2310
24751	13.3540	42.7349	0.2472	0.2668	0.2242

valore di  $a_g$   
mediano

frattili  
84% e 16%

# Quale sarà l'accelerazione massima in un sito, in un assegnato intervallo di tempo?

- Ad esempio per Spoleto (ID 24742)  
per un intervallo di tempo pari a 100 anni si ha
  - Valore mediano  $a_g = 0.1191 \text{ g}$  (frattile 50%)
  - Valore medio  $a_g = 0.1196 \text{ g}$
  - Frattile 16%  $a_g = 0.1032 \text{ g}$
  - Frattile 84%  $a_g = 0.1250 \text{ g}$
- o, per un intervallo di tempo pari a 475 anni
  - Valore mediano  $a_g = 0.2156 \text{ g}$  (frattile 50%)
  - Valore medio  $a_g = 0.2166 \text{ g}$
  - Frattile 16%  $a_g = 0.1928 \text{ g}$
  - Frattile 84%  $a_g = 0.2344 \text{ g}$

# Che probabilità che una accelerazione sia superata in un assegnato intervallo di tempo?

- Abbiamo parlato di "accelerazione massima in un assegnato intervallo di tempo"
- Ma che probabilità c'è che una certa accelerazione sia superata in un assegnato intervallo di tempo?
- Si parte dall'aver determinato il valore mediano dell'accelerazione massima in un assegnato intervallo di tempo, ipotizzando quindi che mediamente in quell'intervallo vi sarà (almeno) un evento sismico di tale intensità
- Si ipotizza che la distribuzione delle accelerazioni nell'intervallo di tempo sia una distribuzione di Poisson

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

## Distribuzione di Poisson:

- Un evento può accadere in maniera casuale in un qualsiasi istante
- L'occorrenza di un evento in un determinato intervallo di tempo è indipendente da quanto si ha in un qualsiasi altro intervallo
- La probabilità di occorrenza di un evento in un piccolo intervallo  $\Delta t$  è proporzionale a  $\Delta t$  e può essere espressa con  $\lambda_s \Delta t$ , dove  $\lambda_s$  è la **possibilità media di occorrenza** dell'evento (assunta costante)

Nota: in genere  $\Delta t$  è espresso in anni,  $\lambda_s$  è quindi espresso in  $\text{anni}^{-1}$

Bibliografia: Alfredo H-S. Ang, Wilson H. Tang, Probability concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Distribuzione di Poisson:

Più specificamente, nel caso di eventi sismici

- Un evento sismico può accadere in maniera casuale in un qualsiasi istante
- L'occorrenza di un evento sismico in un determinato intervallo di tempo è indipendente da quanto si ha in un qualsiasi altro intervallo

Queste ipotesi sono in realtà poco realistiche, perché il terremoto è dovuto a fenomeni fisici e la probabilità di avere un evento dipende dalla energia accumulata ...

Ma noi non siamo in grado di tenere conto di questo

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Distribuzione di Poisson:

Più specificamente, nel caso di eventi sismici

- La probabilità di occorrenza di un evento sismico di intensità pari o superiore ad un valore assegnato  $a_g$  in un piccolo intervallo  $\Delta t$  (in anni) è proporzionale a  $\Delta t$  e può essere espressa con  $\lambda(a_g) \Delta t$ , dove  $\lambda(a_g)$  è la possibilità media di occorrenza dell'evento (assunta costante)

Occorre sempre fare riferimento all'intensità  $a_g$

Note:

- Anche quando scriverò solo  $\lambda$  intenderò sempre  $\lambda(a_g)$
- Con  $a_g$  si intende la PGA (accelerazione di picco al bedrock)

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

## Distribuzione di Poisson:

- Il valore  $\Delta t$  per il quale si ha  
 $\lambda(a_g) \Delta t = 1$  (probabilità 1, cioè 100%)  
rappresenta l'intervallo di tempo per il quale  
mediamente si avrà un terremoto di intensità pari o  
superiore ad un valore assegnato  $a_g$
- Per quanto detto prima, questo è l'intervallo di  
tempo per il quale abbiamo determinato il valore  
mediano dell'accelerazione massima
- Questo intervallo di tempo è indicato con il simbolo  
 $T_R(a_g)$  ed è denominato **periodo di ritorno** (in anni)



# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Distribuzione di Poisson:

- L'intervallo di tempo per il quale mediamente si avrà un terremoto di intensità pari o superiore ad un valore assegnato  $a_g$  è indicato con il simbolo  $T_R(a_g)$  ed è denominato **periodo di ritorno** (in anni) di un terremoto di intensità pari o superiore ad un valore assegnato  $a_g$
- Si ha quindi

$$\lambda(a_g) = \frac{1}{T_R(a_g)}$$

$$T_R(a_g) = \frac{1}{\lambda(a_g)}$$

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Per una distribuzione di Poisson:  
la probabilità  $P$  di avere  $n$  eventi in un intervallo di  
tempo  $\Delta t$ , indicata con  $P(X_i = n)$ , è data da:

$$P(X_i = n) = \frac{(\lambda(a_g) \Delta t)^n}{n!} e^{-\lambda(a_g) \Delta t}$$

La probabilità  $P(X_i=0)$  che non vi sia alcun evento  
sismico ( $n=0$ ) in un intervallo di tempo  $V_R$  è

$$P(X_i = 0) = \frac{(\lambda(a_g) V_R)^0}{0!} e^{-\lambda(a_g) V_R} = e^{-V_R / T_R(a_g)}$$

La probabilità che vi sia almeno un evento in un  
intervallo di tempo  $V_R$  è

$$P_{VR} = 1 - P(X_i = 0) = 1 - e^{-V_R / T_R}$$

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

La probabilità che vi sia almeno un evento sismico di intensità pari o superiore ad un valore assegnato  $a_g$  in un intervallo di tempo  $V_R$  è denominata "probabilità di superamento"  $P_{VR}$  e vale

$$P_{VR} = 1 - e^{-V_R / T_R}$$

E, viceversa, si ha la relazione tra  $T_R$  e  $P_{VR}$

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Relazione tra periodo di ritorno  $T_R$   
e probabilità di superamento  $P_{VR}$

La probabilità di superamento è data dalla relazione:

$$P_{VR} = 1 - e^{-V_R / T_R}$$

Esempio:

Periodo di ritorno 475 anni

La probabilità di superamento in 50 anni è:

$$P_{VR} = 1 - e^{-50 / 475} = 0.10 = 10\%$$

# Trattazione probabilistica degli eventi sismici

Relazione tra periodo di ritorno  $T_R$   
e probabilità di superamento  $P_{VR}$

Il periodo di ritorno è dato dalla relazione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Esempio:

Probabilità di superamento del 10% in 50 anni

Il periodo di ritorno è:

$$T_R = -\frac{50}{\ln(1 - 0.10)} = 474.6 \cong 475 \text{ anni}$$

# Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

Nell'ambito del Progetto Finalizzato Geodinamica si sono prese in considerazione le seguenti probabilità di superamento, con i periodi di ritorno corrispondenti:

$P(V_R=50 \text{ anni})$	$T_R$ (esatto)	$T_R$ (arrotondato)
81%	30.1	30
63%	50.3	50
50%	72.1	72
39%	101.2	101
30%	140.2	140
22%	201.2	201
10%	474.6	475
5%	974.8	975
2%	2474.9	2475

# Intensità sismica corrispondente ad una assegnata probabilità di superamento

- Nel sito INGV sono riportata in dettaglio il valore mediano ed i frattili 16% e 84% ottenuti dal Progetto Finalizzato Geodinamica, suddivisi in più fogli di calcolo Excel
- I valori mediani sono riportati anche nelle NTC08, Tabella 1 e 2

Nota: i valori sono riferiti al bedrock, cioè allo strato roccioso. Se al di sopra di questo vi sono strati di terreno deformabile (sabbia, argilla) occorre valutare l'effetto della stratigrafia del sito

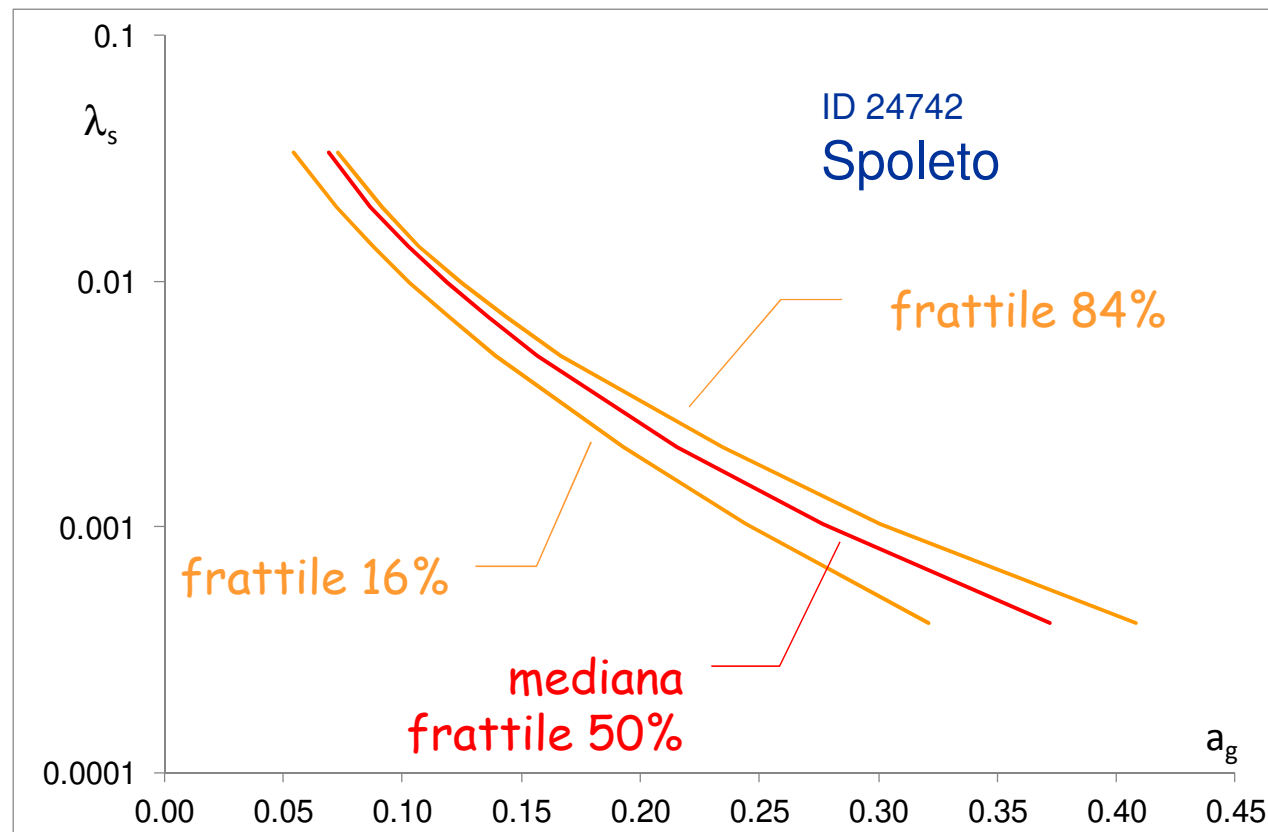
# Curva di pericolosità

- I valori relativi ad un sito possono essere diagrammati nella cosiddetta curva di pericolosità, che mostra la relazione tra la possibilità media di occorrenza  $\lambda_s = 1/T_R$  e l'accelerazione  $a_g$



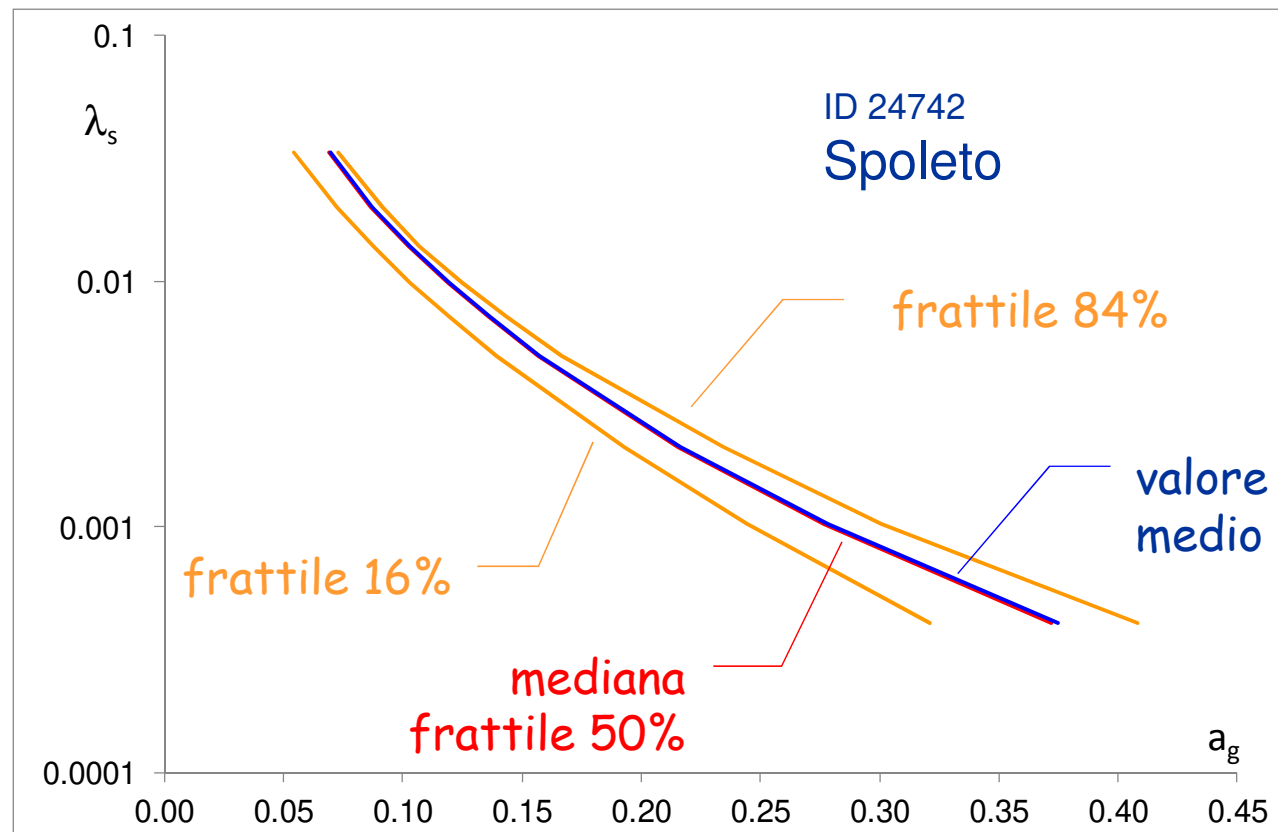
# Curva di pericolosità

- La curva di pericolosità mostra la relazione tra la possibilità media di occorrenza  $\lambda_s = 1/T_R$  e l'accelerazione  $a_g$  (mediana, frattili 16% e 84%)

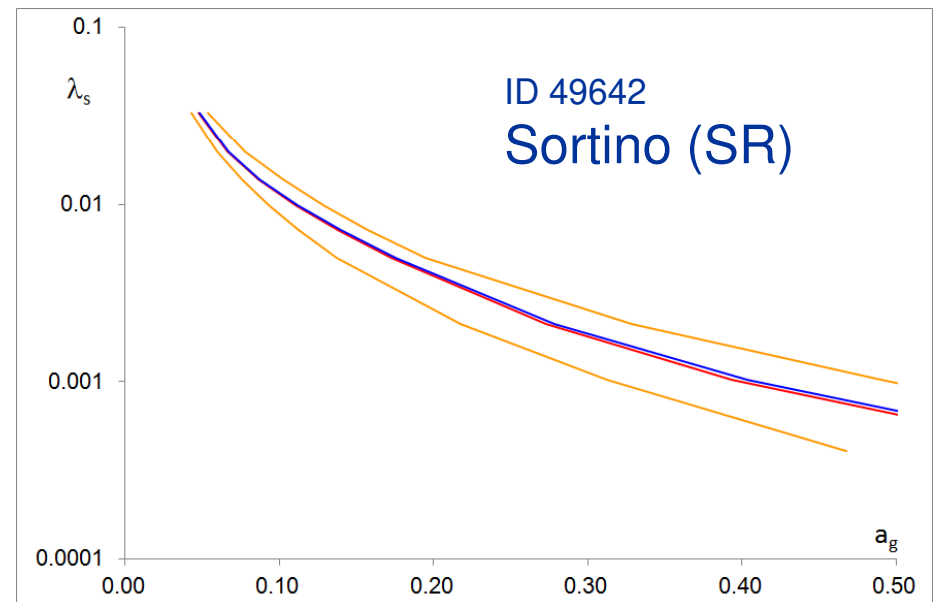
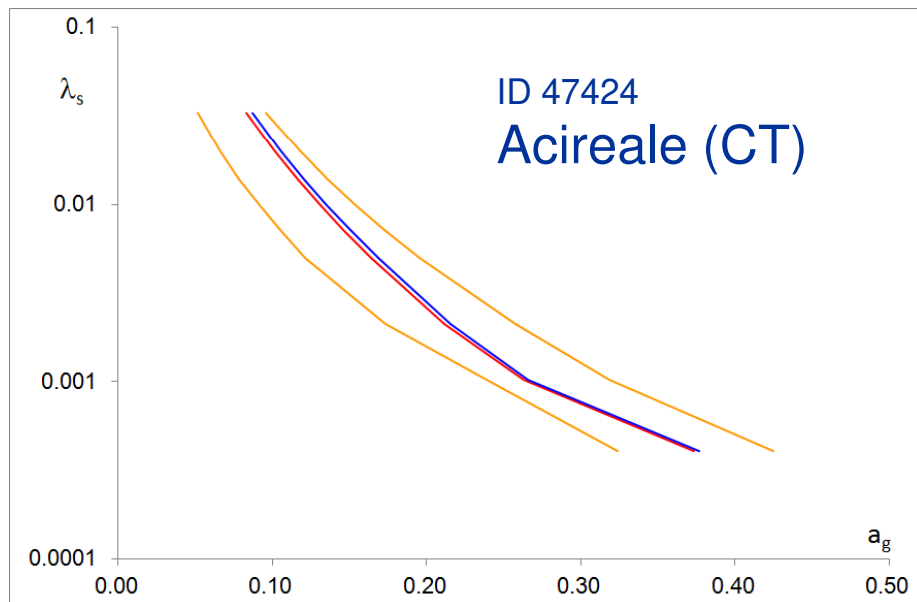
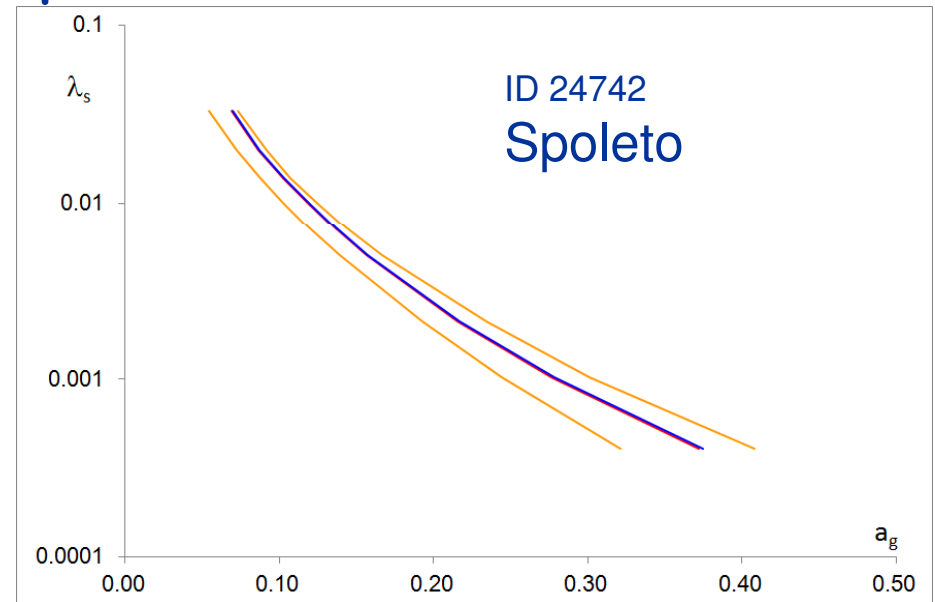
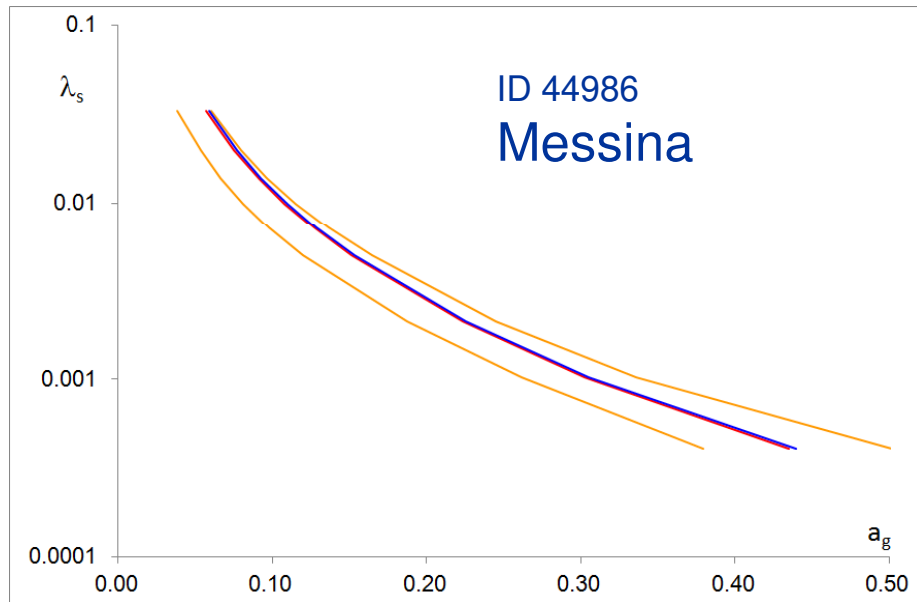


# Curva di pericolosità

- È possibile calcolare e diagrammare anche il valore medio, ma questo non differisce in maniera rilevante dal valore mediano

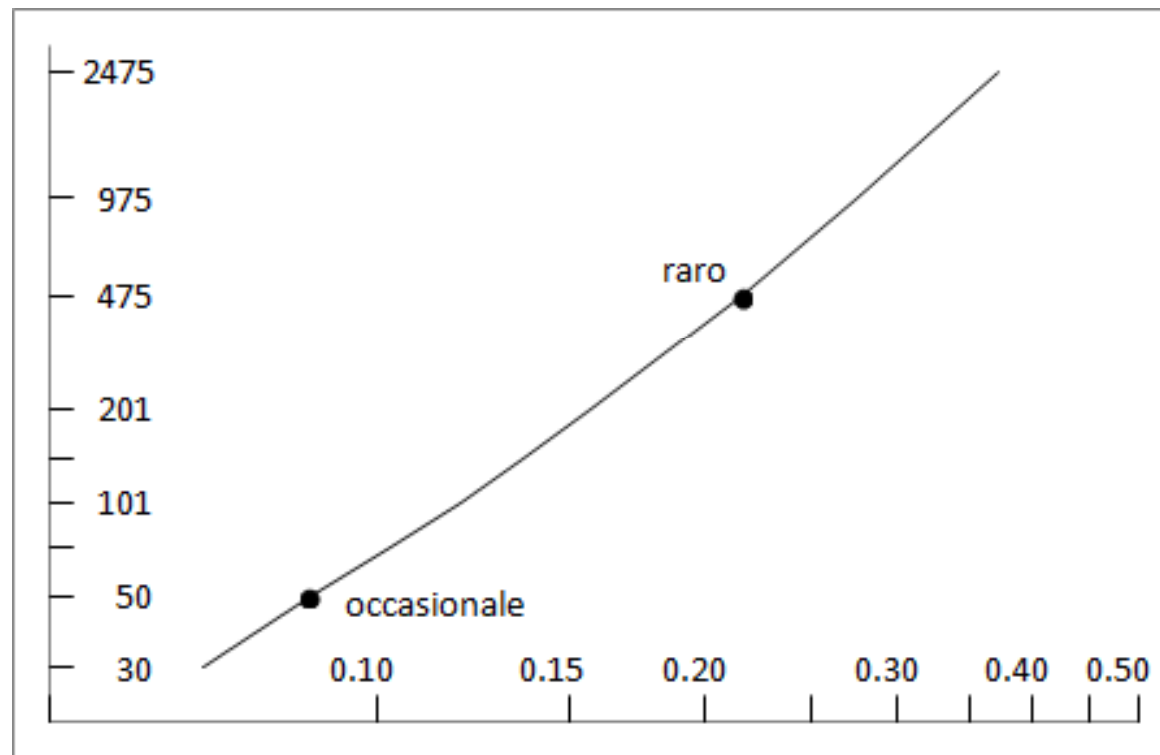


# Curva di pericolosità esempi



# Accelerazione e periodo di ritorno

- Gli stessi valori possono essere diagrammati riportando il periodo di ritorno in funzione dell'accelerazione, usando per entrambi una scala logaritmica

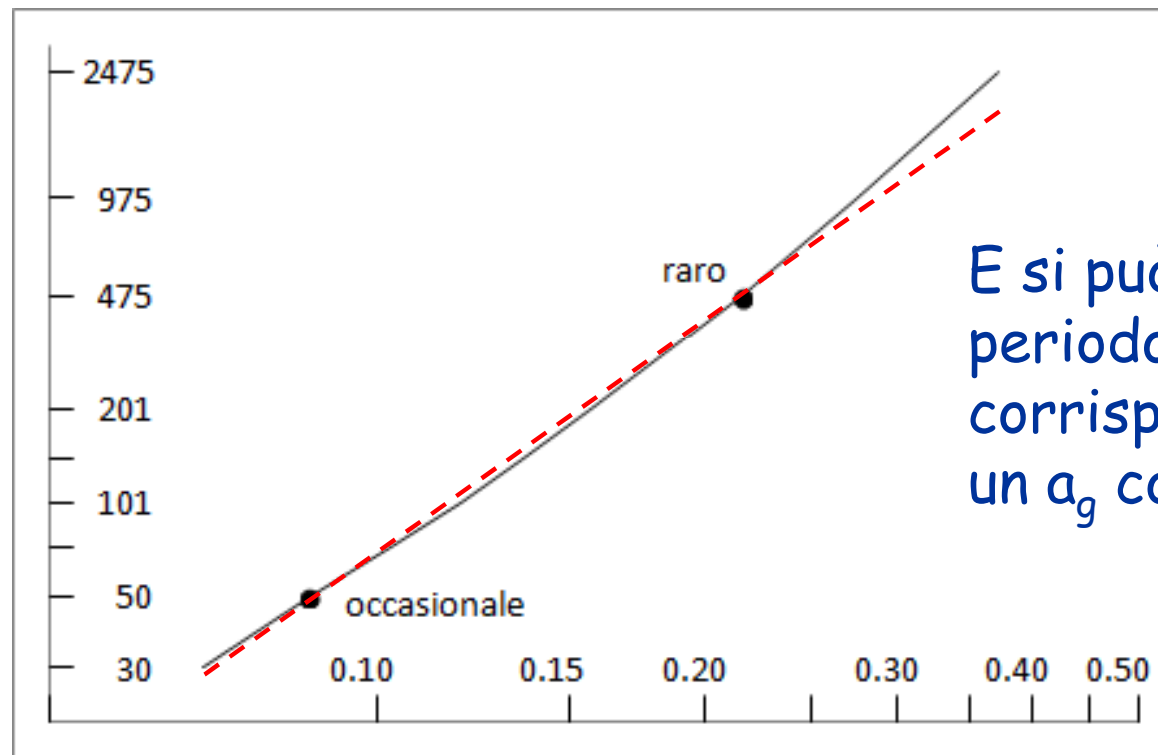


# Accelerazione e periodo di ritorno

- L'andamento è quasi lineare. La pendenza  $\eta$  può essere calcolata come

$$\eta = \frac{\ln(T_{R,1} / T_{R,2})}{\ln(a_{g,1} / a_{g,2})}$$

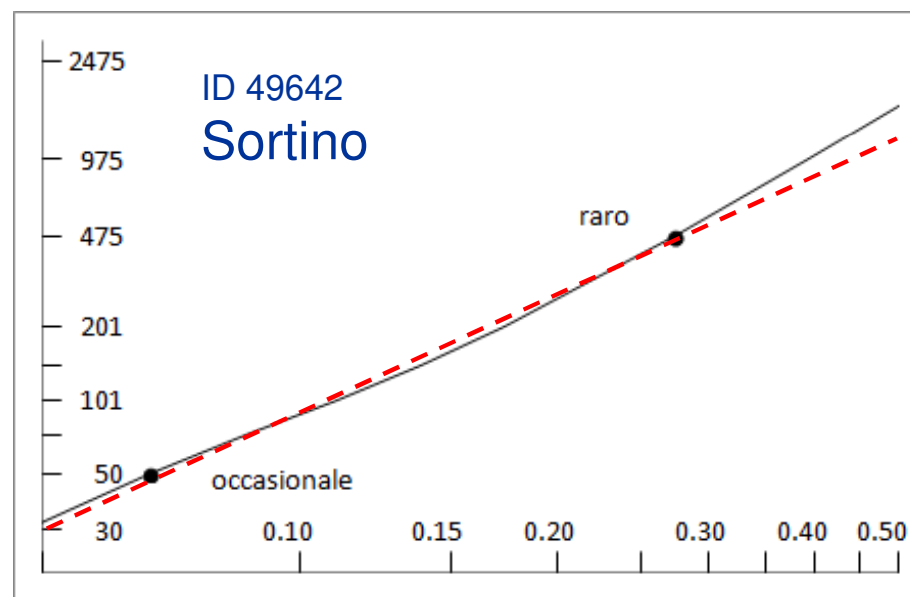
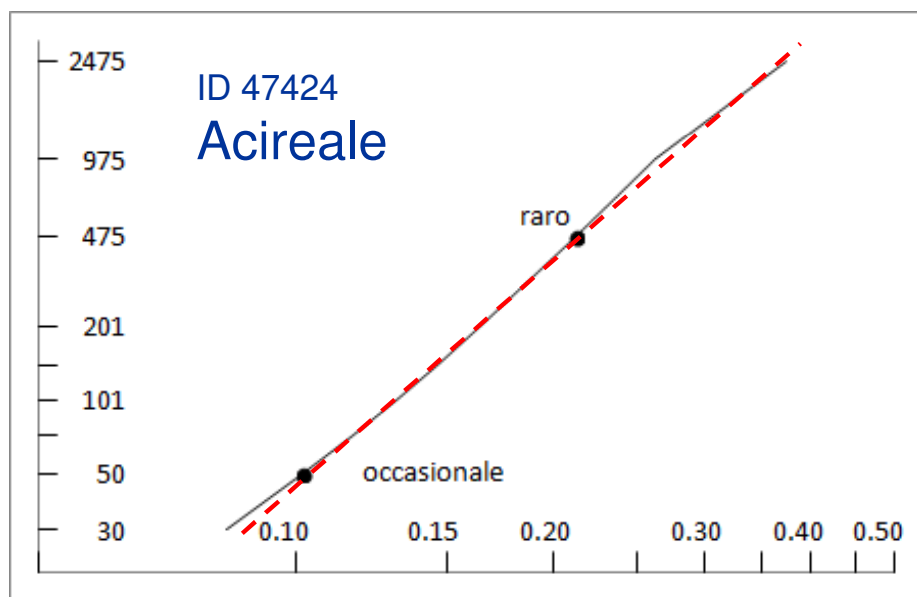
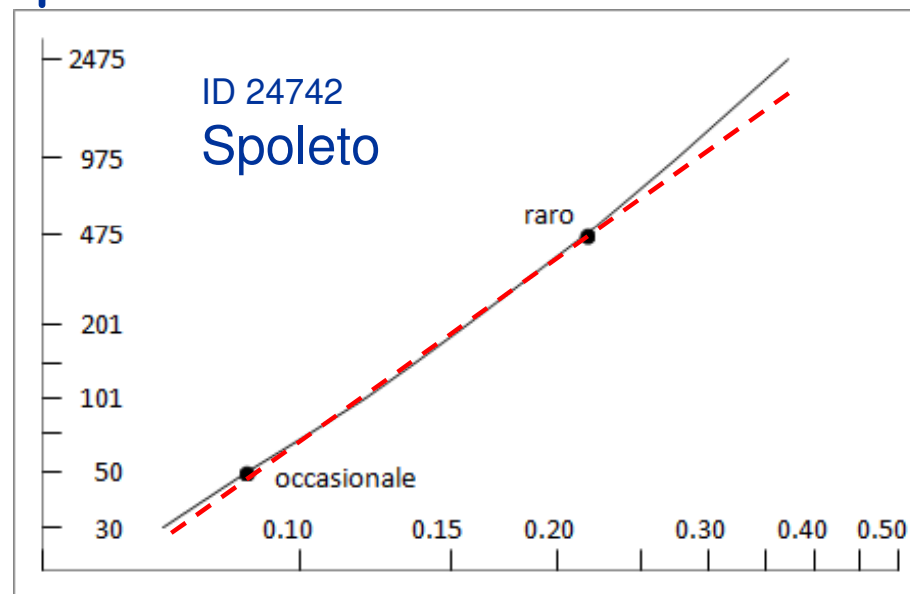
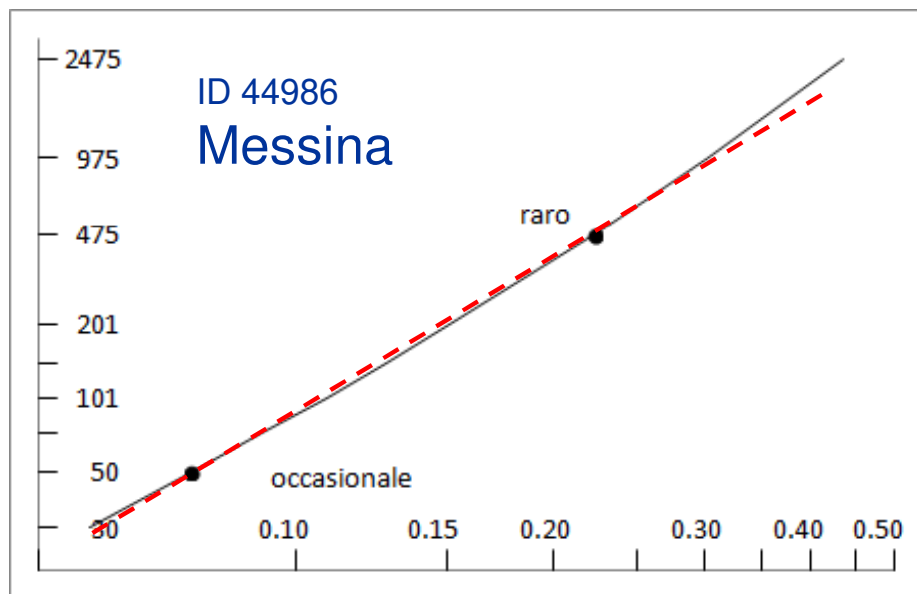
Avendo più punti si può calcolare la pendenza tratto per tratto, ottenendo esponenti leggermente diversi



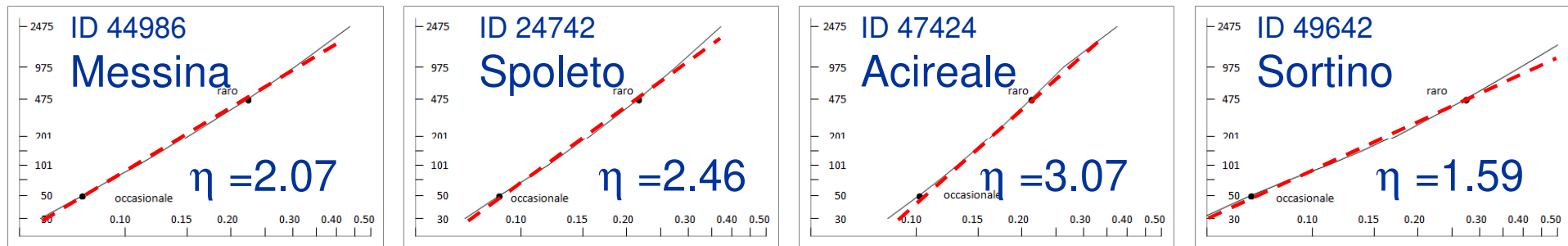
E si può calcolare il periodo di ritorno corrispondente ad un  $a_g$  con

$$T_R = T_{R,2} \left( \frac{a_g}{a_{g,2}} \right)^\eta$$

# Accelerazione e periodo di ritorno esempi



# Accelerazione e periodo di ritorno



- Una norma attuale (DM 28/2/17) suggerisce di usare sempre come esponente  $\eta = 1/0.41 = 2.44$  oppure di differenziarlo in funzione di  $a_g$
- Con questa differenziazione si avrebbe nei primi tre casi  $\eta = 1/0.43 = 2.33$ , nel quarto  $\eta = 1/0.49 = 2.04$
- È evidente che l'unico modo corretto per scegliere l'esponente  $\eta$  consiste nel far riferimento ai dati del sito

# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

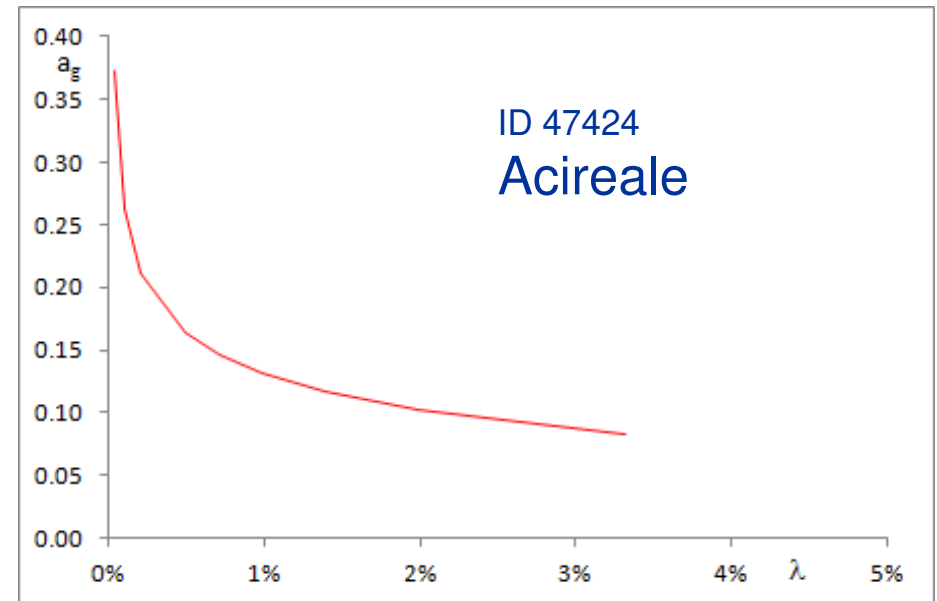
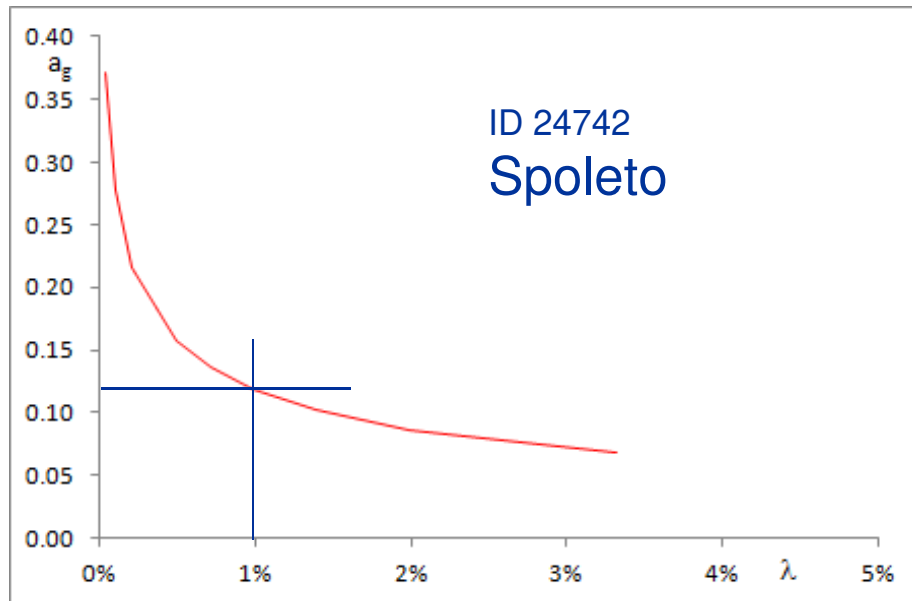
- È anche possibile diagrammare l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza
- Questo consente di fare valutazioni sulla probabilità di avere determinati valori dell'accelerazione in assegnati intervalli di tempo



# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

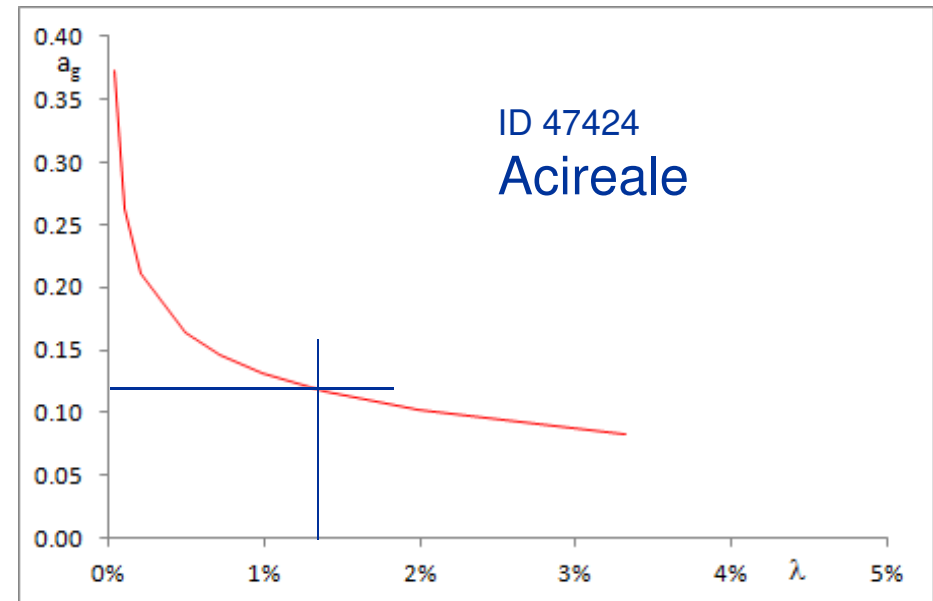
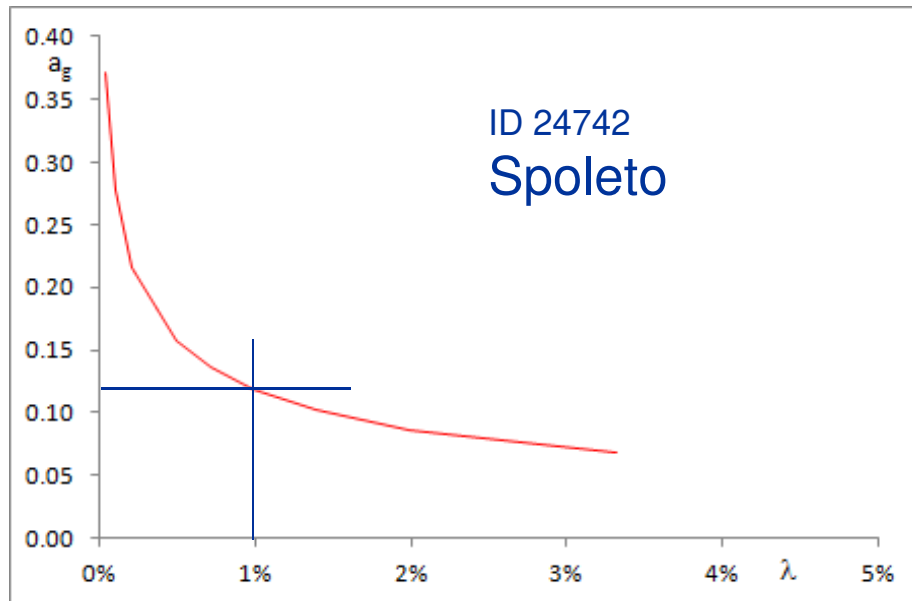
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
  - A Spoleto ho 1 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.118 g



# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

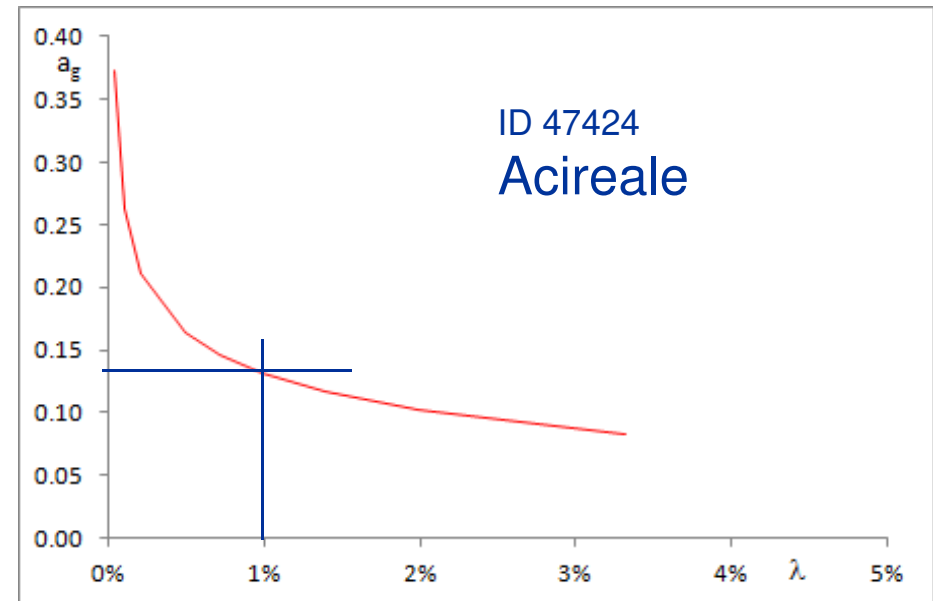
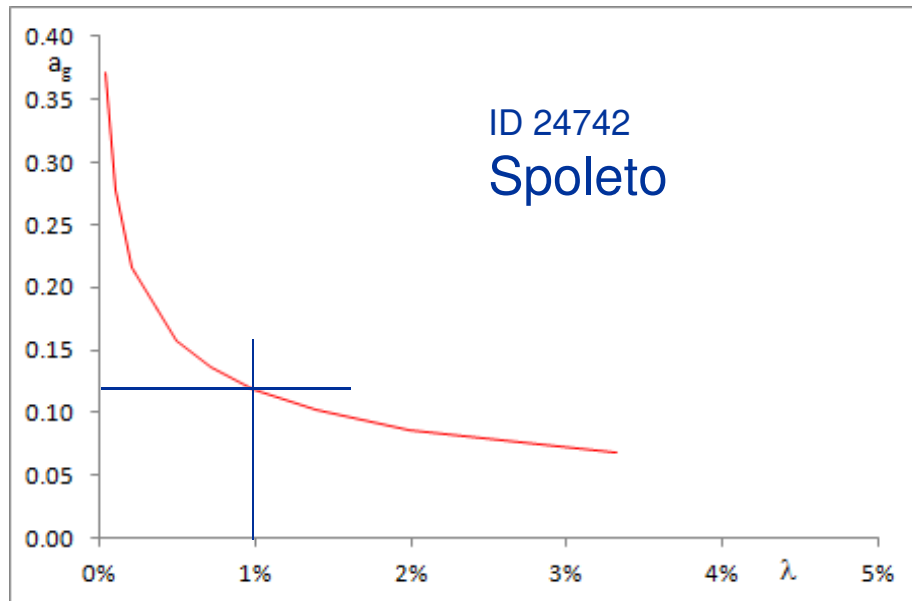
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
  - Ad Acireale ho 1.33 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.118 g



# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

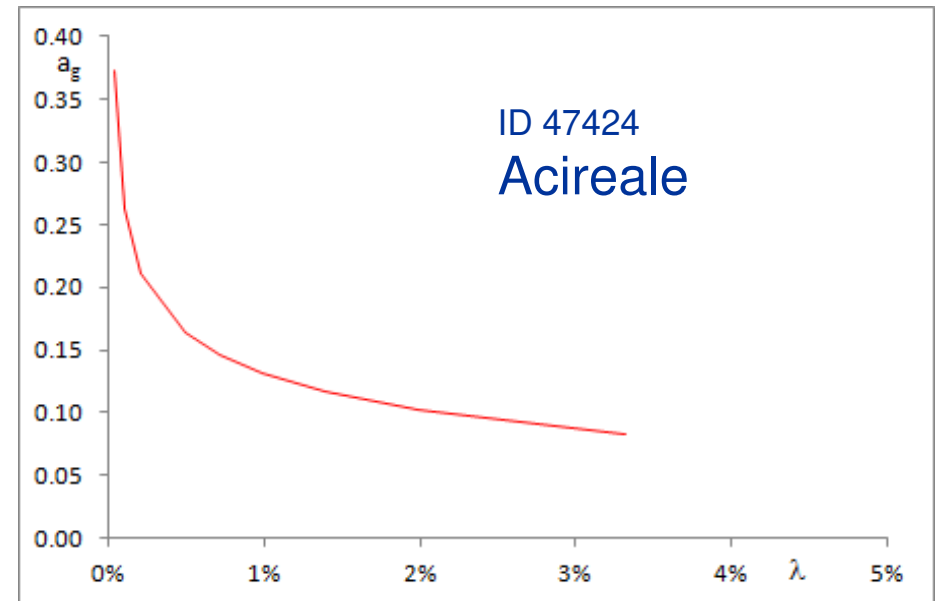
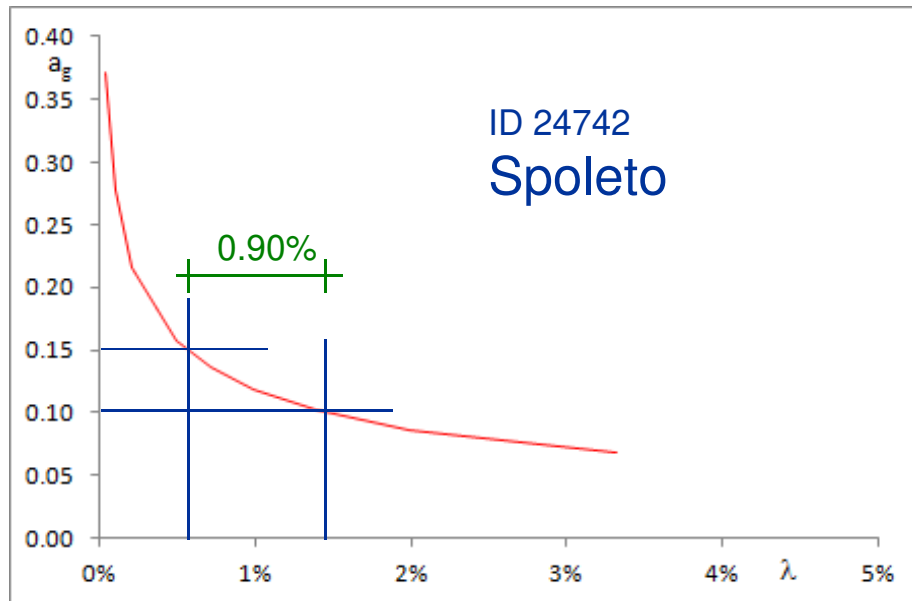
- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
  - Ad Acireale ho 1 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità pari o superiore a 0.131 g



# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
  - A Spoleto ho 0.90 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità tra 0.10 g e 0.15 g



# Accelerazione

## e possibilità media di occorrenza

- Diagrammando l'accelerazione in funzione della possibilità media di occorrenza si può vedere ad esempio che:
  - Ad Acireale ho 1.42 probabilità su 100 di avere in un anno un terremoto di intensità tra 0.10 g e 0.15 g

