

**Giornata Seminariale Progetto RE-FRESCOS**

***Giovedì 29 Novembre 2012, Aula Albenga (DISEG)***



## **Work Package (WP) 2**

**Damage analysis of decorated surface structural support by the Acoustic Emission technique**

---

**Il Sacro Monte di Varallo:  
Correlazione tra Emissioni Acustiche e terremoti**

# Il Sacro Monte di Varallo



**Alla fine del XV secolo, il frate francescano Bernardino Caimi di Milano, di ritorno dalla Terra Santa, decide di riprodurre in Valsesia i luoghi santi di Palestina. Il Sacro Monte, composto da una basilica e da quarantacinque cappelle affrescate e popolate da oltre ottocento statue, ripropone le tappe salienti della vita di Cristo.**

# La Cappella XVII della Trasfigurazione



**Questa cappella fu costruita nell'ambito del progetto generale di rinnovamento del Sacro Monte voluto dal finanziere milanese Giacomo D'Adda e redatto dall'architetto perugino Galeazzo Alessi dopo la prima metà del 1500.**

**Risultava già iniziata, per la parte relativa alle fondazioni, nel 1572, ma venne ultimata soltanto negli anni sessanta del Seicento.**

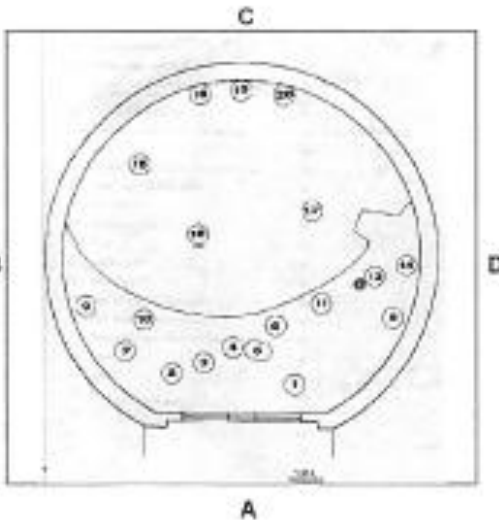
# Condizioni strutturali della Cappella XVII

Lo stato di conservazione della Cappella XVII è sintetizzato nella seguente scheda, contenuta nella “Relazione di verifica ed indagine statica”, redatta nell’Aprile del 2009 dall’Ing. Emanuele Giletti.

	A	B	C	D	Pronao
25) LESIONI muratura esterna					
25) LESIONI muratura interna		*		*	
27) LESIONI volte					*
28) LESIONI voltini finestre ecc.	*				
29) CORNICIONI		***	***	***	***

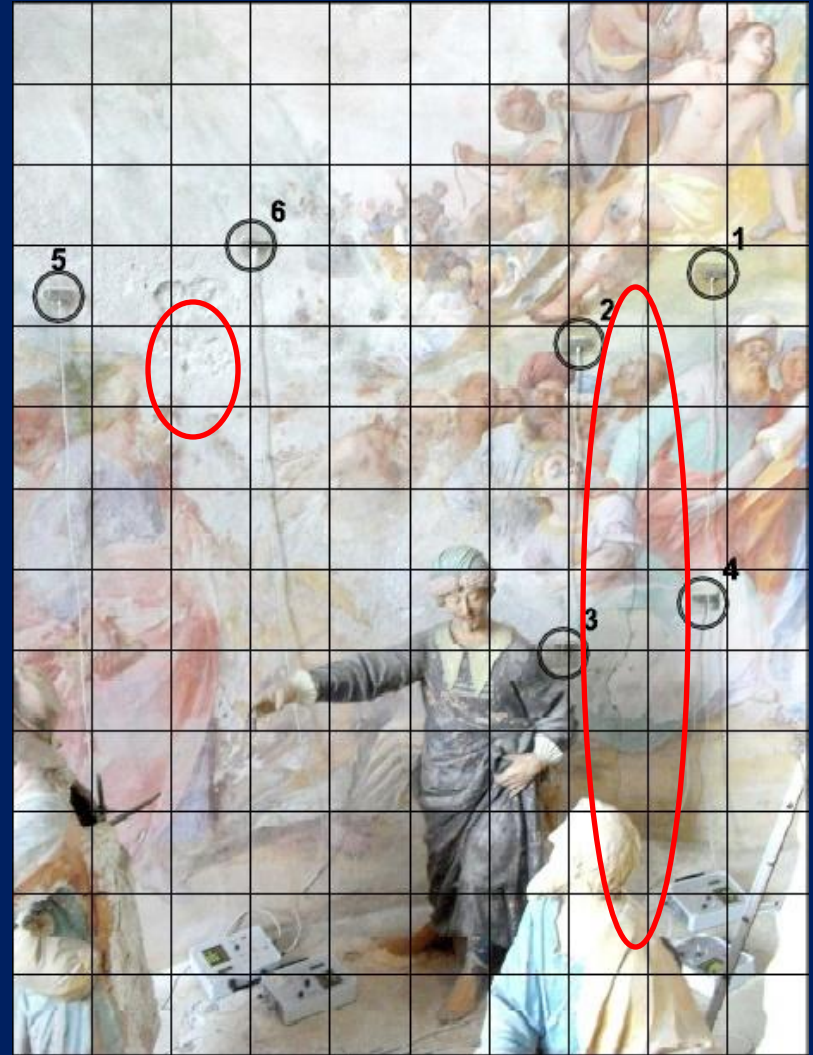
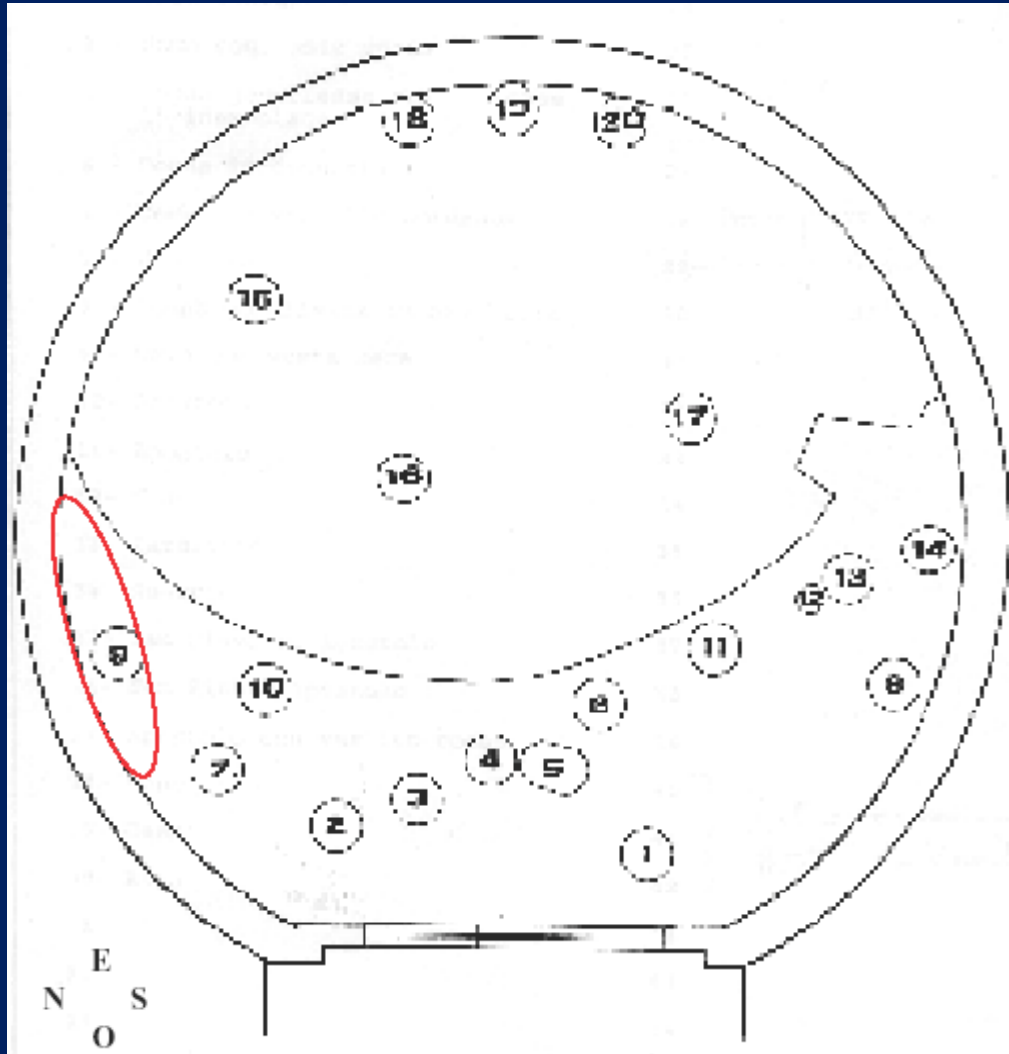
  

\*\*\* urgente  
 \*\* indispensabile  
 \* tenere sotto controllo  
 non preoccupante

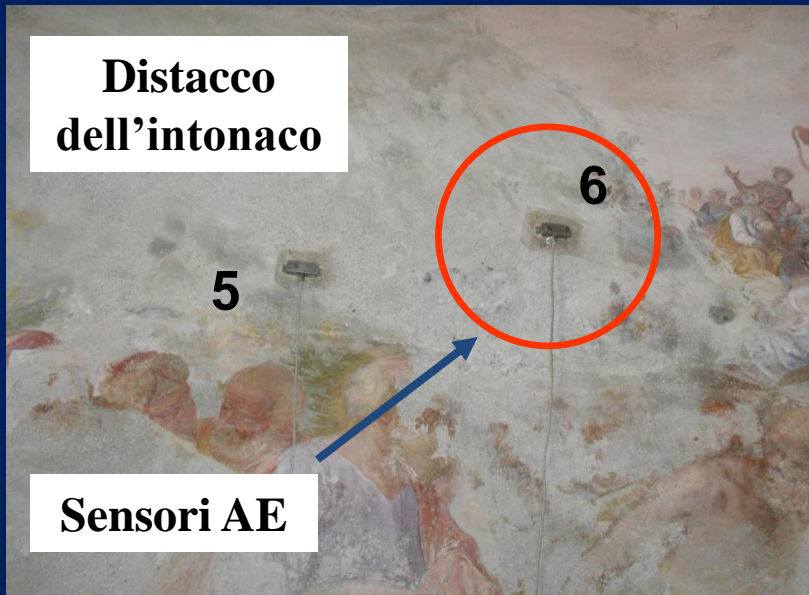
**[Ing. E. GILETTI]**  
 Buono stato di conservazione generale come nel 2001-2004-2007; Nel 2003 restauro della copertura e lanternino  
 -Gradinata e pavimento pronao da sistemare  
 -Sigillatura frontone pronao e basi colonne  
 -Piccole lesioni volta pronao (come 2001-2007)  
 -Distacchi di intonaco lato A e piccola lesione voltino (come 2001-2007)  
 -Vecchia lesione muro lato B interno, passante verticalmente tra la figura nudo a metà di braccio e la testa ed il braccio manica verde, delle figure sottostanti, (come 2001-2007)  
 -Lato D: lesione: lesione su apertura tamponata (come 2001-2007)  
 -Impalcato in legno "Monte" in buono stato  
 Si dispone di aggiungere 2 fessurimetri per monitorare la lesione lato B  
 Sopralluogo 09.04.2009

# Zone monitorate



**La cappella XVII presenta alcuni segni di danneggiamento. Si è voluto monitorare l'attività AE legata ad una lesione nella muratura ed al distacco dell'intonaco affrescato.**

# Applicazione dei sensori AE

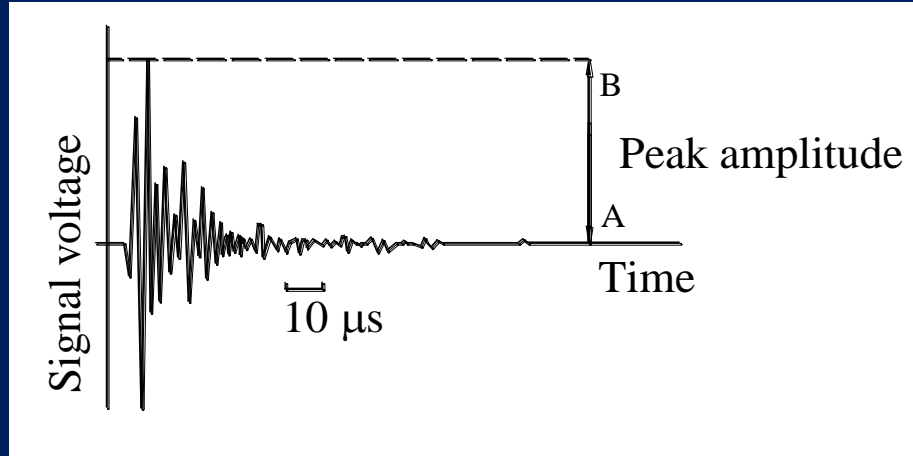
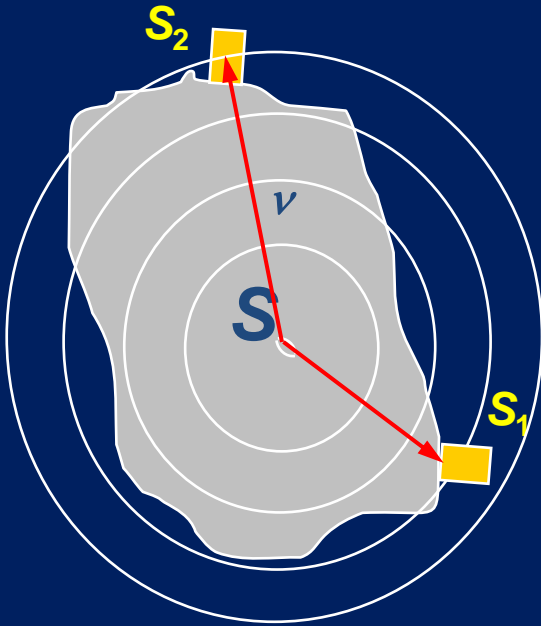


**Carta giapponese incollata con una resina acrilica “paraloid” che viene adoperata nel campo del restauro come consolidante a basse concentrazioni (2-4%) o come collante in concentrazioni maggiori.**

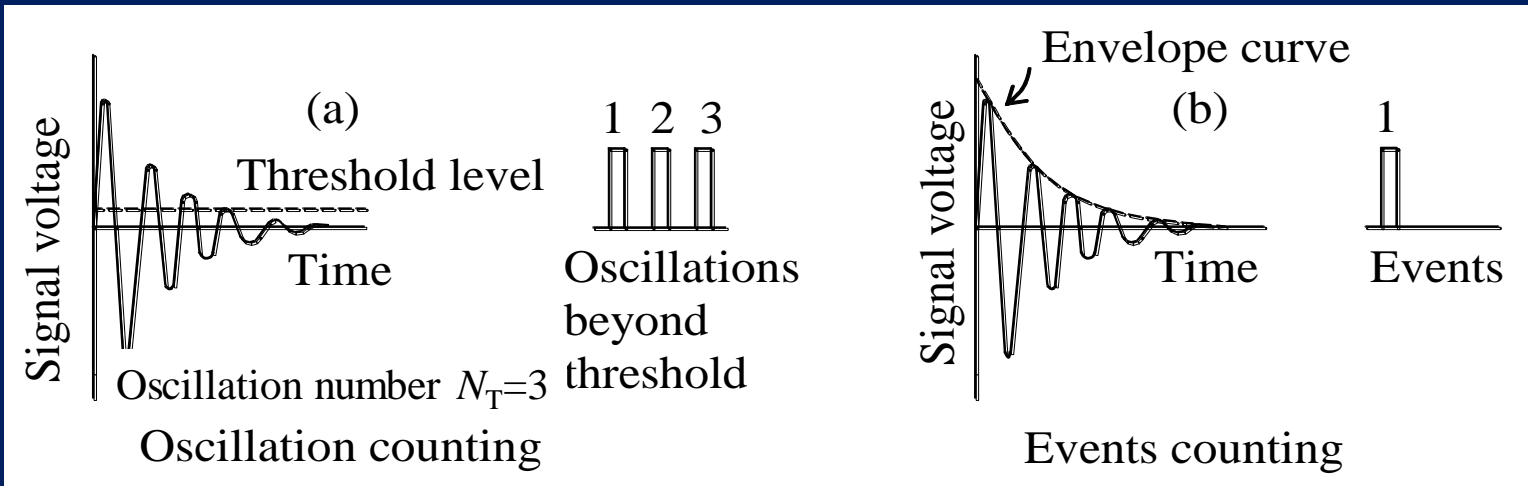
**Lo strato di “paraloid” forma un ottima base protettiva per la successiva applicazione, tramite colla siliconica, dei sensori AE.**



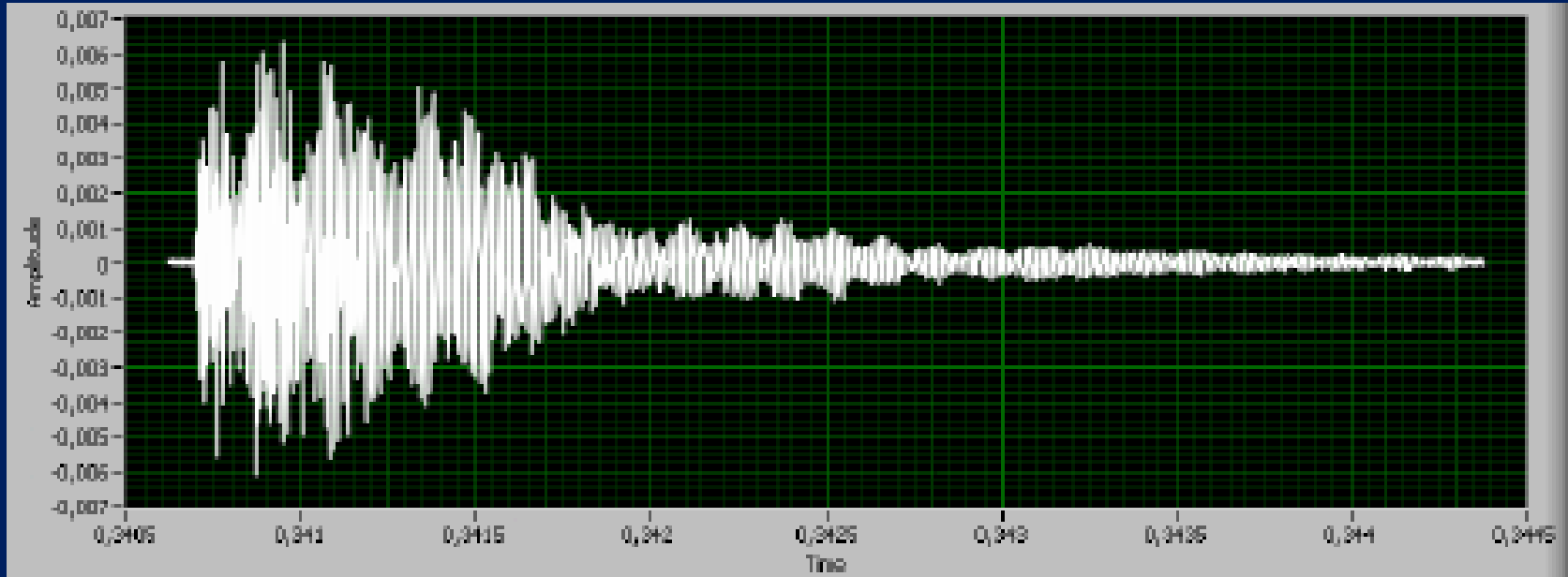
# La tecnica delle emissioni acustiche



Il fenomeno della frattura è accompagnato dall'emissione di onde elastiche che si propagano all'interno del materiale. Queste onde possono essere captate da trasduttori PZT applicati alla superficie dell'elemento strutturale.



# Segnali AE identificato dai sensori

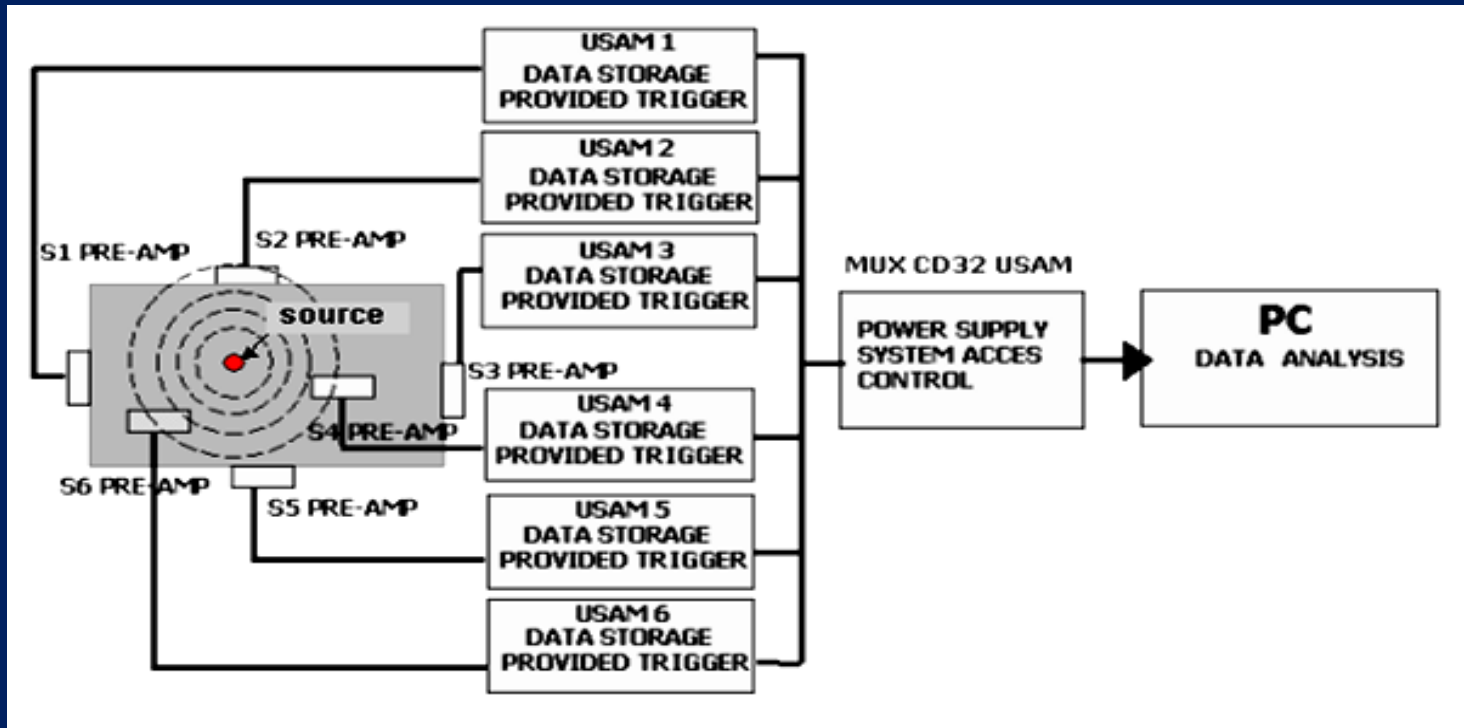


L'onda elastica captata dai sensori come sollecitazione meccanica è pre-amplificata e trasformata in segnale elettrico; quest'ultimo è filtrato per eliminare le frequenze indesiderate.

Il segnale così ottenuto può essere rappresentato come una oscillazione smorzata ed analizzato tramite un misuratore del numero di oscillazioni che superino una certa soglia predeterminata in Volt.



# Unità sincrona di acquisizione monocanale - USAM



- I trasduttori piezoelettrici (PZT) sono stati calibrati in un intervallo di frequenze compreso tra 50 e 800 kHz.
- Il sistema di acquisizione USAM consiste di 6 sensori pre-amplificati, 6 unità di immagazzinamento dei dati, un'unità centrale per le operazioni di sincronizzazione ed un misuratore di soglia.
- La caratterizzazione dei dati viene ottenuta tramite il rilevamento, il calcolo in tempo reale ed l'associazione di diversi parametri significativi dell'evento osservato.

# Distribuzione cumulativa dei segnali AE: *b*-value

La relazione di Gutenberg-Richter è stata applicata con successo al campo delle emissioni acustiche per lo studio della distribuzione delle ampiezze delle onde AE:

$$\text{Log}_{10}N(\geq m) = a - bm, \quad \text{or} \quad N(\geq m) = 10^{a-bm}, \quad (1)$$

*N*: cumulato degli eventi di emissione acustica con magnitudo  $\geq m$

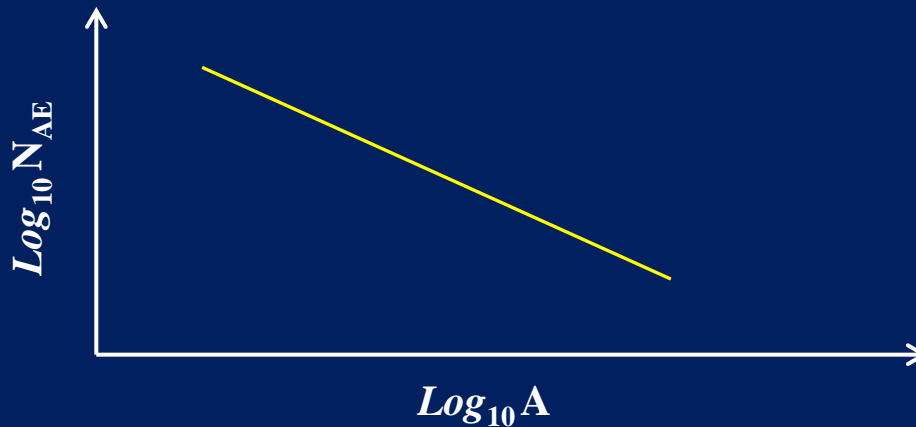
La magnitudo, nel campo delle emissioni acustiche, è definita come segue:

$$m \propto \text{Log}_{10}A_{\max} \quad (2)$$

$A_{\max}$  : ampiezza del segnale misurata in microvolt.

# Distribuzione cumulativa dei segnali AE: *b*-value

Il *b*-value viene ricavato attraverso il calcolo della pendenza della retta di regressione della serie di eventi AE nel piano bi-logaritmico  $\text{Log } N - \text{Log } A$ :



$$b = \frac{\text{Log}_{10} N_{AE}}{\text{Log}_{10} A}$$

Il *b*-value cambia durante le fasi del danneggiamento e quindi può essere interpretato come un indicatore del processo di formazione ed evoluzione delle fratture.

*b*-value  $\cong 1.5$  condizioni critiche      *b*-value  $\rightarrow 1.0$  collasso imminente

# Interpretazione del $b$ -value

In analogia con i terremoti, la dimensione del danneggiamento legato alle emissioni acustiche implica la validità della relazione:

$$N(\geq L) = c L^{-D}, \quad (3)$$

$N$ : cumulato degli eventi AE generati da un difetto sorgente con dimensione lineare caratteristica  $\geq L$ ;

$L$ : dimensione lineare del difetto;

$c$ : costante di proporzionalità;

$D$ : dimensione frattale del dominio di danneggiamento.

# Interpretazione del $b$ -value

Carpinteri (1994) ha mostrato che le equazioni (1) e (3) sono equivalenti e comportano:

$$D = 2b. \quad (4)$$

Il  $b$ -value identifica le modalità di dissipazione energetica durante il monitoraggio. I casi estremi prevedibili sono:

- $b = 1.5 \rightarrow D = 3$ : la dissipazione di energia avviene attraverso piccoli difetti distribuiti nel volume;
- $b = 1 \rightarrow D = 2$  : la dissipazione di energia avviene lungo una superficie.

Nel primo caso si può osservare un danneggiamento diffuso, nel secondo caso si formano fratture bi-dimensionali che portano al collasso l'elemento strutturale.

---

Carpinteri, A., "Scaling laws and renormalization groups for strength and toughness of disordered materials". *International Journal of Solids and Structures*, 31, 291-302 (1994).

Carpinteri, A., Lacidogna, G., Puzzi, S., "From criticality to final collapse: evolution of the " $b$ -value" from 1.5 to 1.0", *Chaos, Solitons & Fractals*, 41, 843-853 (2009).

# Dipendenza dal tempo dei segnali AE: $\beta_t$

La dissipazione di energia, misurata con la tecnica delle emissioni acustiche durante un processo di danneggiamento, segue la legge temporale:

$$W \propto N \propto t^{\beta_t}, \text{ with } 0 \leq \beta_t \leq 3,$$

$W$ : energia dissipata;

$N$ : cumulata degli eventi AE ottenuti durante il monitoraggio;

$t$ : durata del monitoraggio;

$\beta_t$ : esponente del tempo scala per l'energia rilasciata.

Estrapolando l'esponente  $\beta_t$  dai dati ottenuti durante il periodo di osservazione, si può effettuare una predizione sulle condizioni di stabilità della struttura:

**$\beta_t < 1$ : il processo è stabile;**

**$\beta_t \cong 1$ : il processo è metastabile;**

**$\beta_t > 1$ : il processo tende all'instabilità.**

# Prima fase di monitoraggio

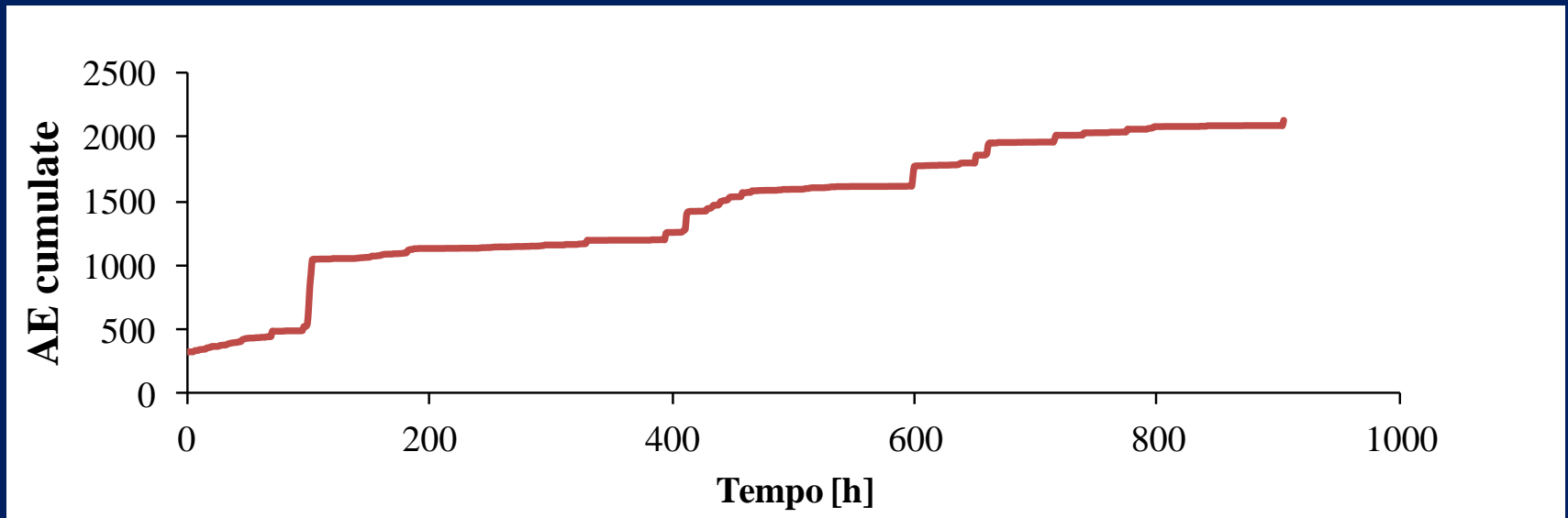
- (a) **Dati complessivi AE**  
**9 maggio 2011 - 16 giugno 2011**
- (b) **Monitoraggio della lesione**  
**Sensori 1, 2, 3, 4.**
- (c) **Monitoraggio del distacco dell'intonaco**  
**Sensori 5, 6.**

# Seconda fase di monitoraggio

- (a) **Dati complessivi AE**  
**5 luglio 2011 - 5 settembre 2011**
- (b) **Monitoraggio della lesione**  
**Sensori 1, 2, 3, 4.**
- (c) **Monitoraggio del distacco dell'intonaco**  
**Sensori 5, 6.**

# Dati complessivi di monitoraggio

## 9 maggio 2011 - 16 giugno 2011



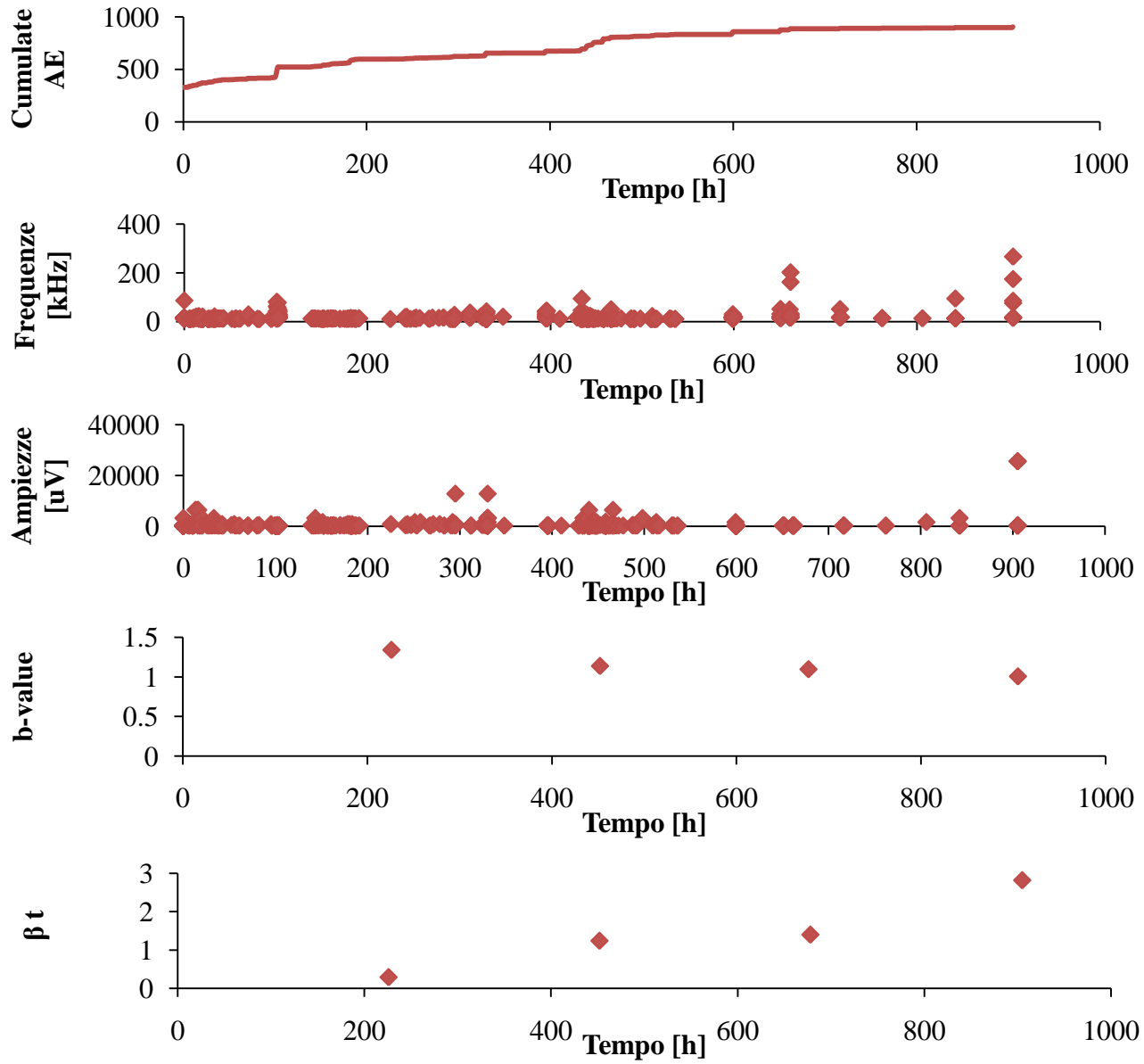
(a)



# Monitoraggio della lesione

## 9 maggio 2011 - 16 giugno 2011

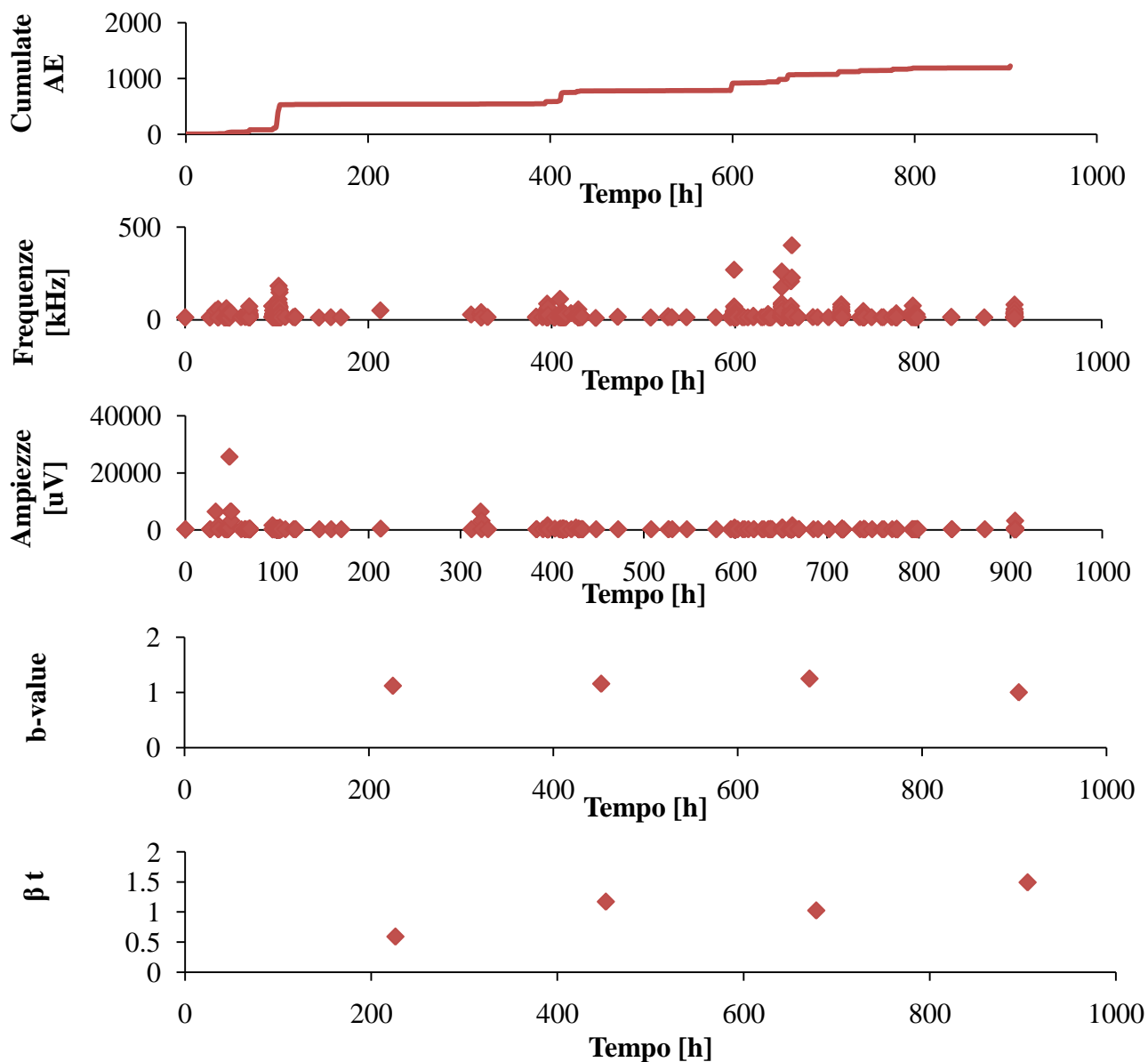
(b)



# Monitoraggio del distacco dell'intonaco

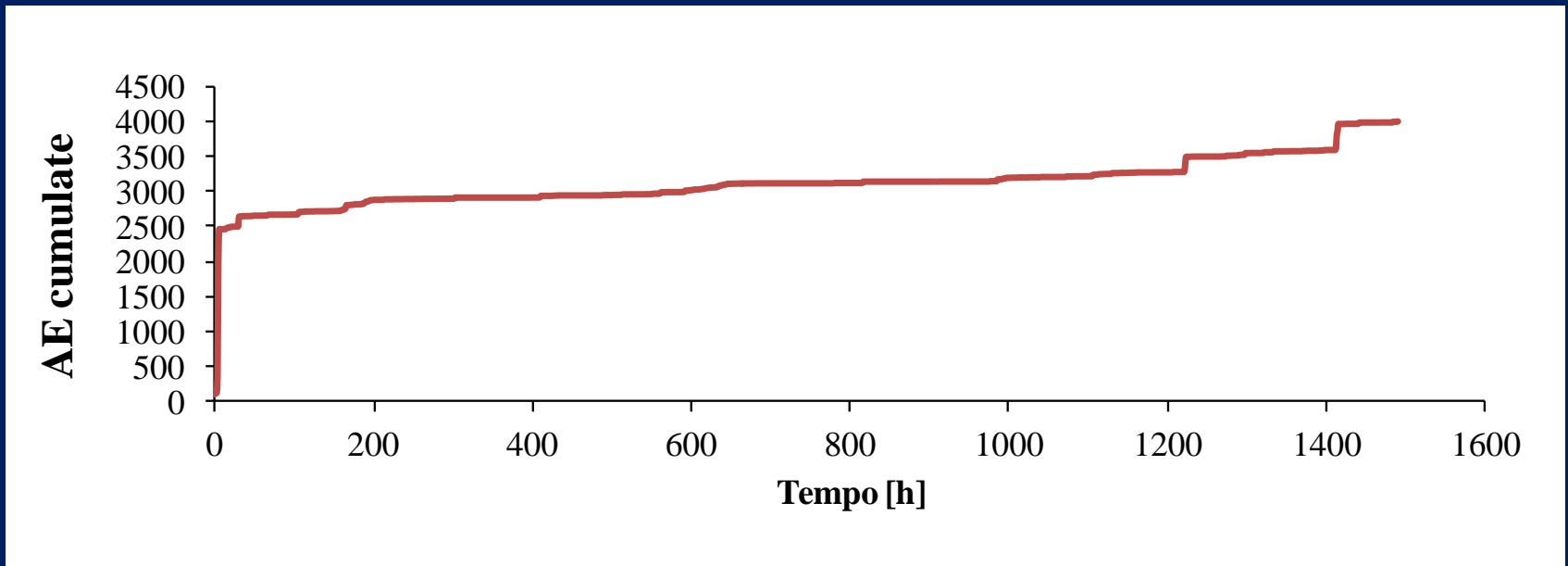
## 9 maggio 2011 - 16 giugno 2011

(c)



# Dati complessivi di monitoraggio

## 5 luglio 2011 - 5 settembre 2011

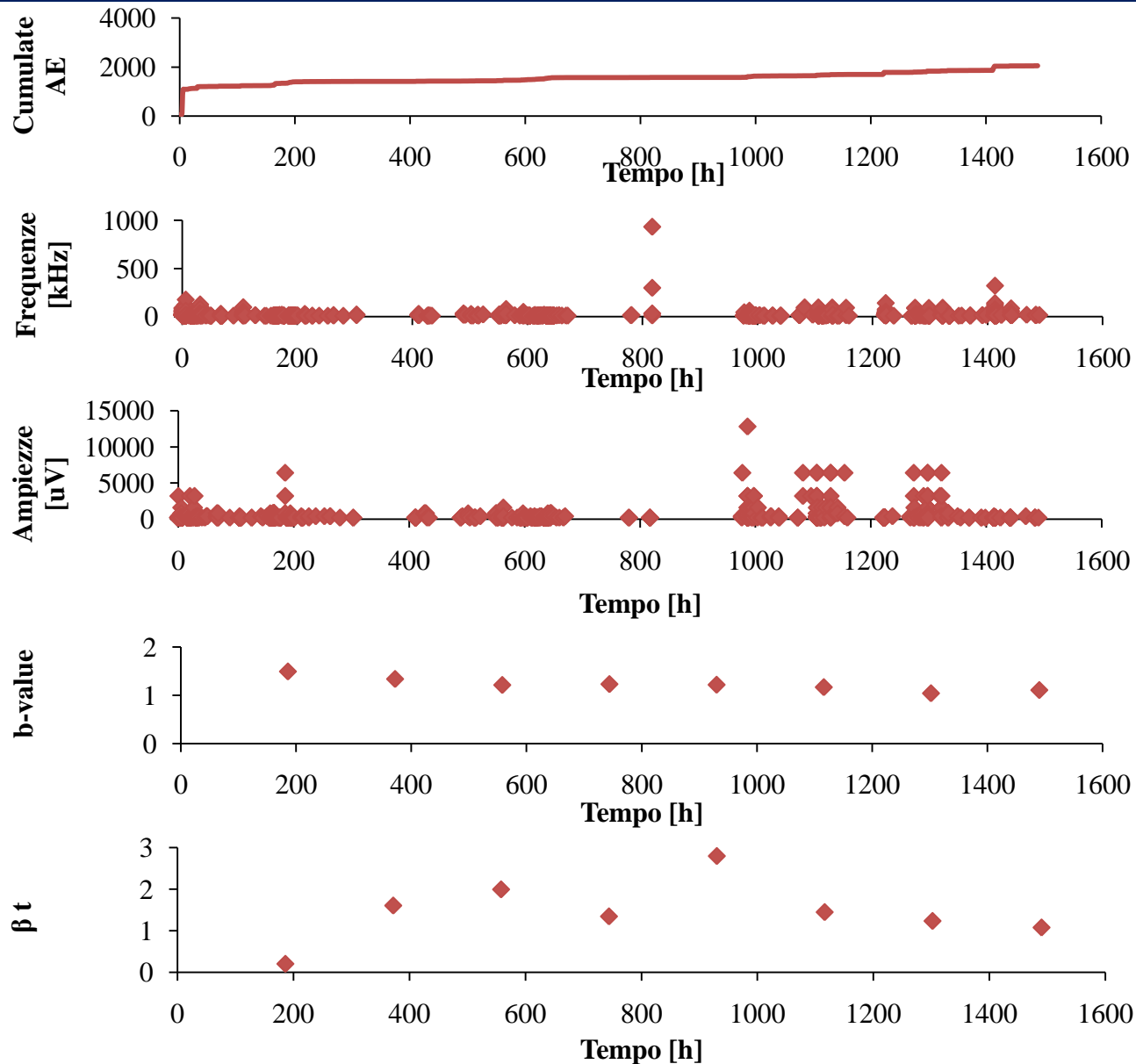


(a)

# Monitoraggio della lesione

## 5 luglio 2011 - 5 settembre 2011

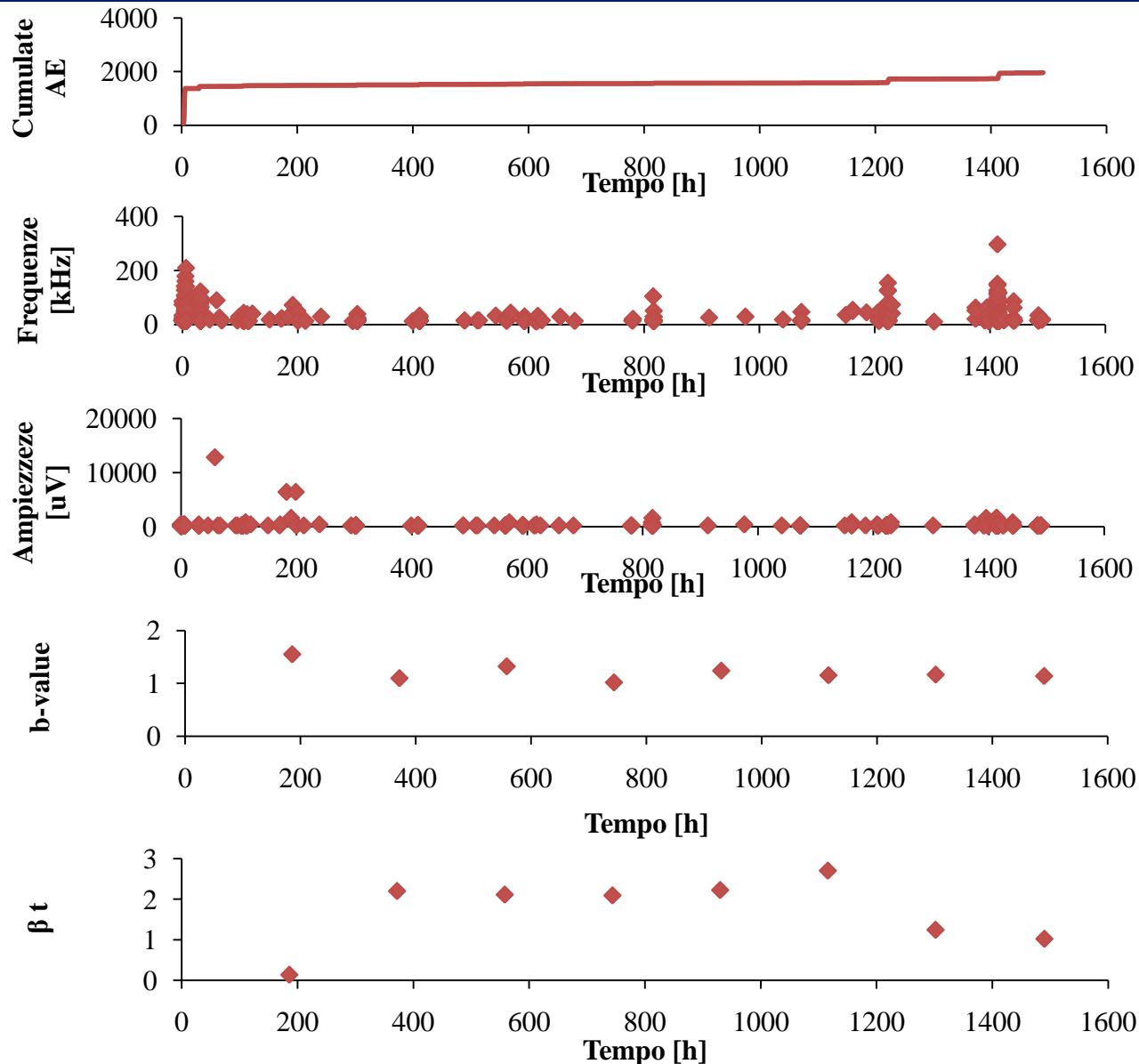
(b)



# Monitoraggio del distacco dell'intonaco

## 5 luglio 2011 - 5 settembre 2011

(c)



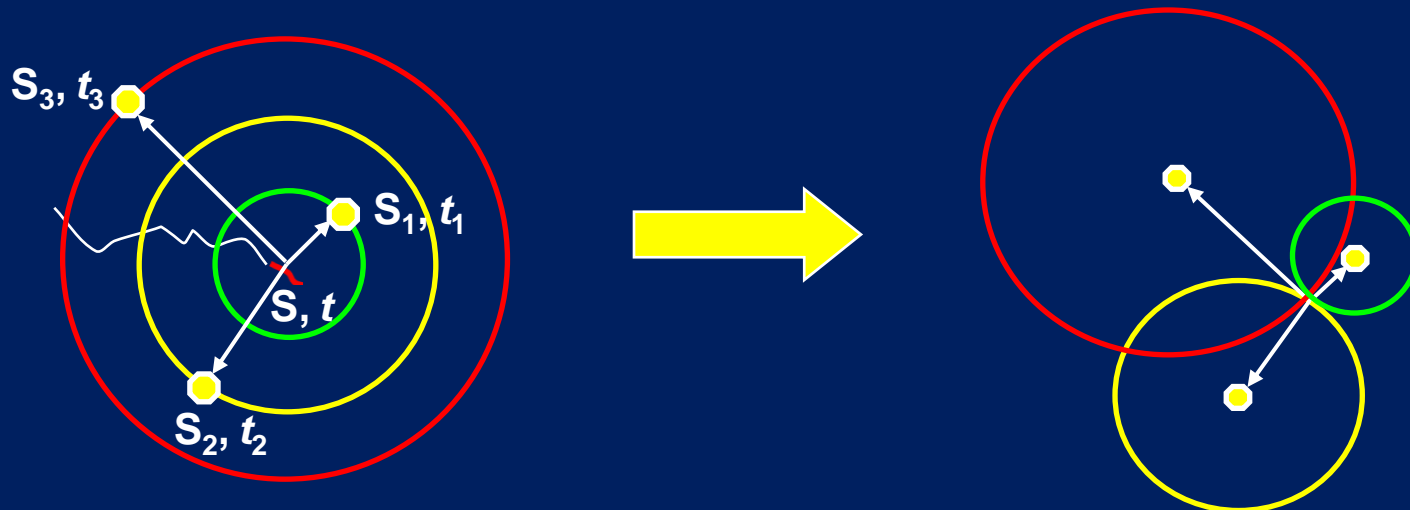
# Il problema della localizzazione

Il tempo che impiega un segnale di emissione acustica per percorrere la distanza tra la sorgente in posizione  $(x_0, y_0, z_0)$  ed un sensore in posizione  $(x_A, y_A, z_A)$  è calcolato tramite la seguente relazione:

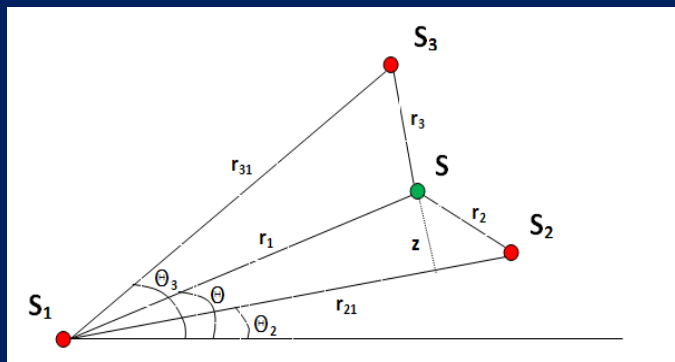
$$T_A = \left[ (x_0 - x_A)^2 + (y_0 - y_A)^2 + (z_0 - z_A)^2 \right]^{1/2} / c,$$

L'equazione precedente ha tre incognite, quindi per localizzare una sorgente occorre che almeno tre sensori captino uno stesso evento. Ai fini dell'individuazione dell'istante di emissione è necessario un quarto sensore di riferimento.

$$\Delta t_A = T_A - T_R = \left[ (x_0 - x_A)^2 + (y_0 - y_A)^2 + (z_0 - z_A)^2 \right]^{1/2} / c - T_R.$$



# Localizzazione delle sorgenti AE



Considerando il triangolo \$SS\_1S\_2\$ si può scrivere:

$$r_2 - r_1 = v\Delta t_{21}$$

$$z = r_1 \sin(\theta - \theta_2)$$

$$z^2 = r_2^2 - [r_{21} - r_1 \cos(\theta - \theta_2)]^2$$

Sostituendo la seconda equazione nella terza si ottiene:

$$r_1^2 = r_2^2 - r_{21}^2 + 2r_{21}r_1 \cos(\theta - \theta_2)$$

Eliminando \$r\_2\$ e ricordando che \$r\_i = v(t\_i - t\_0)\$ si ottiene:

$$r_1 = \frac{r_{21}^2 - \Delta t_{21}^2 v^2}{2(\Delta t_{21} v + r_{21} \cos(\theta - \theta_2))}$$

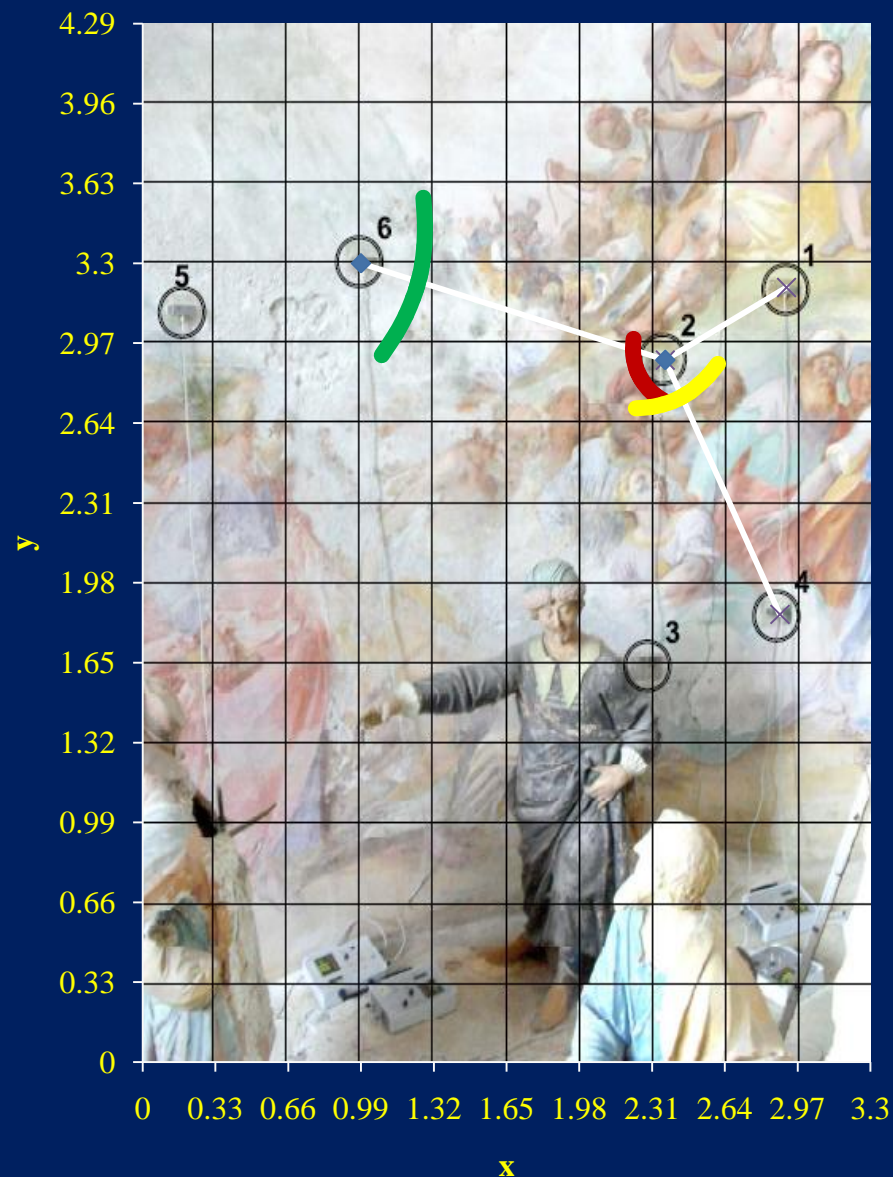
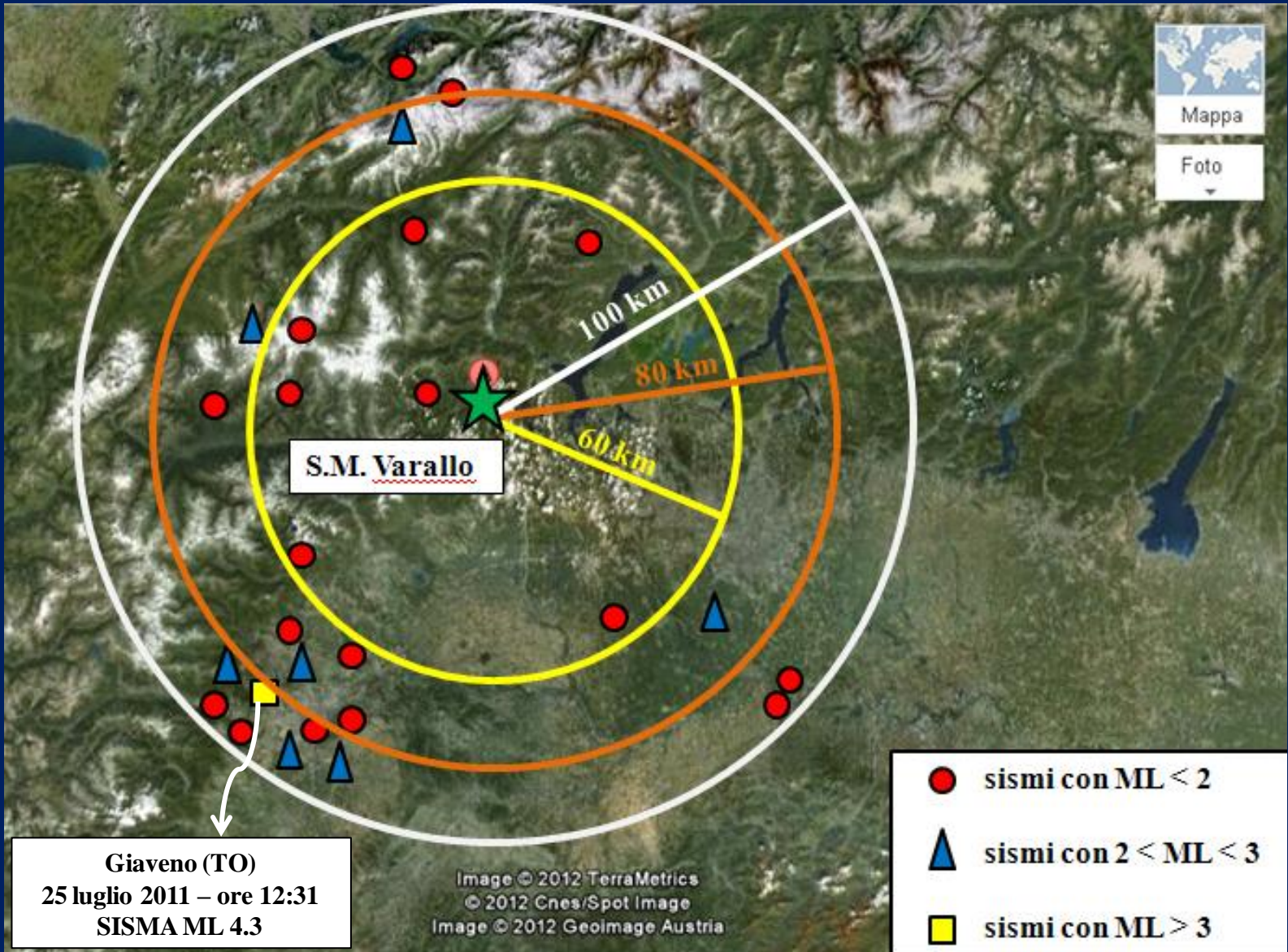


Grafico delle regioni di confidenza

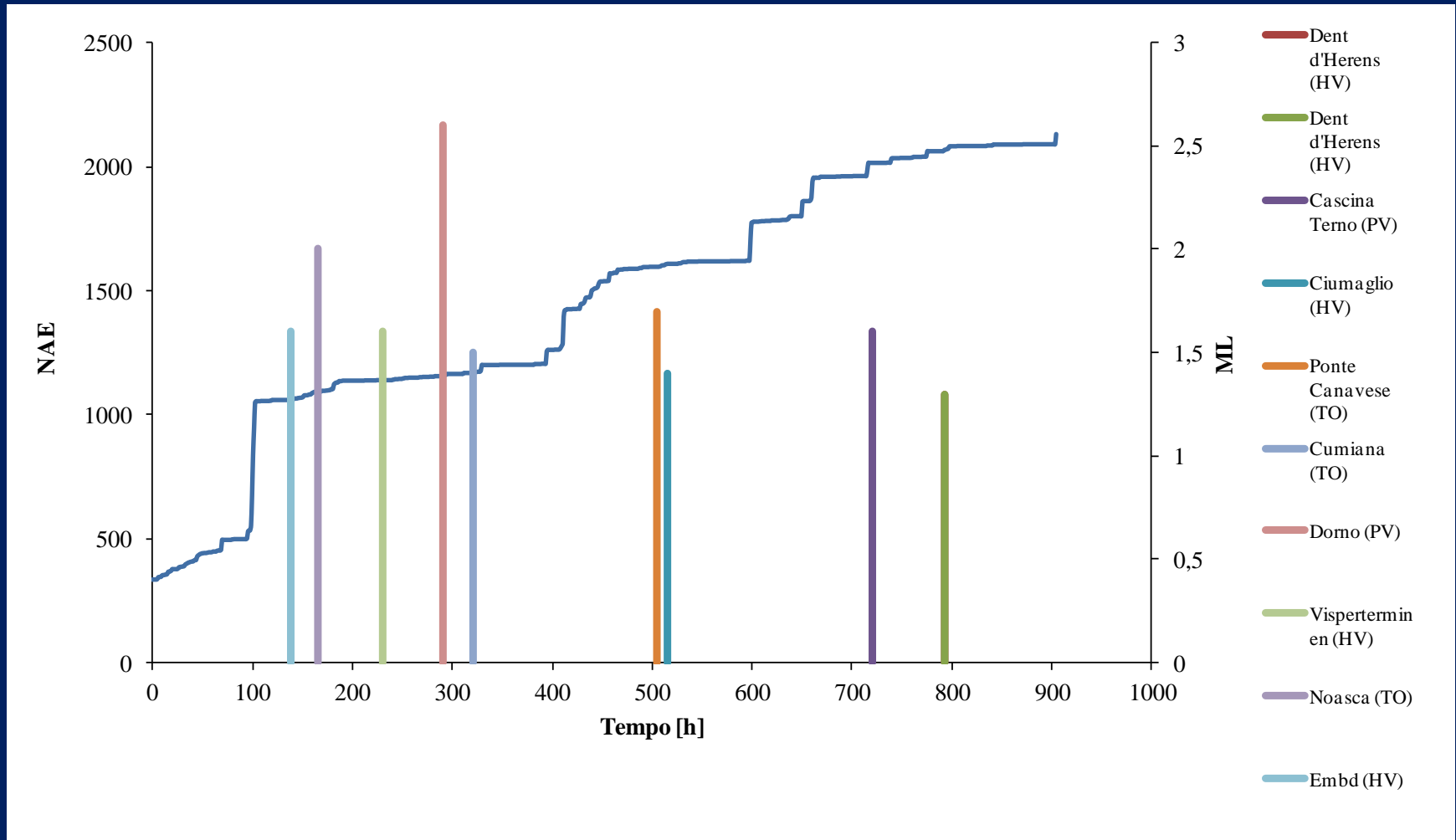
# L'emissione acustica come precursore sismico





# Eventi sismici ed emissioni acustiche

## monitoraggio 9 maggio 2011 - 16 giugno 2011



# Algoritmo di Grassberger – Procaccia

## monitoraggio 9 maggio 2011 - 16 giugno 2011

Tab. probabilità cumulata C+ AE come precursore

	60 km	80 km	100 km
<b>1 settimana</b>	0.0339	0.1121	0.2018
<b>2 settimane</b>	0.0772	0.2130	0.3661
<b>3 settimane</b>	0.1228	0.3018	0.4875
<b>4 settimane</b>	0.1487	0.3661	0.5549
<b>5 settimane</b>	0.1630	0.4321	0.6210

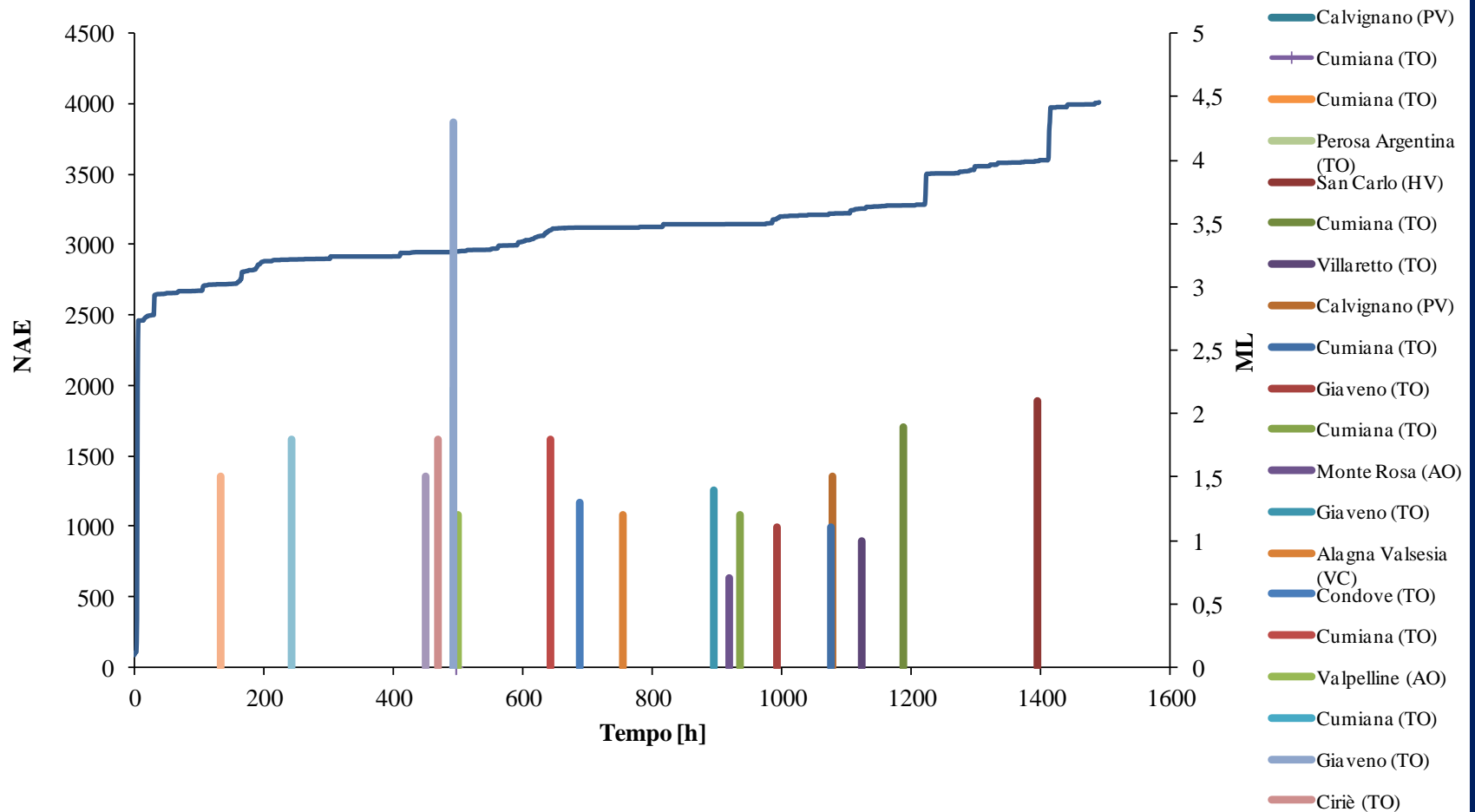
Tab. probabilità cumulata C- AE come aftershock

	60 km	80 km	100 km
<b>1 settimana</b>	0.0254	0.0732	0.1437
<b>2 settimane</b>	0.0357	0.1196	0.2629
<b>3 settimane</b>	0.0371	0.1509	0.3362
<b>4 settimane</b>	0.0371	0.1652	0.3732
<b>5 settimane</b>	0.0371	0.1665	0.3768

$$C_{\pm}(r, \tau) \equiv \frac{1}{N_{EQ} N_{AE}} \sum_{k=1}^{N_{EQ}} \sum_{j=1}^{N_{AE}} \Theta(r - |x_k - x_j|) \Theta(\tau - |t_k - t_j|) \Theta(\pm(t_k - t_j))$$

L'algoritmo di correlazione di Grassberger-Procaccia viene applicato ai dati ottenendo un comportamento da precursore delle AE. E' evidente che la struttura si comporta come ricevitore sismico.

# Eventi sismici ed emissioni acustiche monitoraggio 5 luglio - 5 settembre 2011



# Algoritmo di Grassberger – Procaccia

## monitoraggio 5 luglio 2011 - 5 settembre 2011

Tab. probabilità cumulata C+ AE come precursore

	60 km	80 km	100 km
<b>1 settimana</b>	0.0075	0.0278	0.0846
<b>2 settimane</b>	0.0184	0.0552	0.1896
<b>3 settimane</b>	0.0239	0.0833	0.3222
<b>4 settimane</b>	0.0346	0.1040	0.3841
<b>5 settimane</b>	0.0498	0.1210	0.4435
<b>6 settimane</b>	0.0557	0.1268	0.5130
<b>7 settimane</b>	0.0557	0.1268	0.5497
<b>8 settimane</b>	0.0557	0.1268	0.5607
<b>9 settimane</b>	0.0557	0.1268	0.5657

Tab. probabilità cumulata C- AE come aftershock

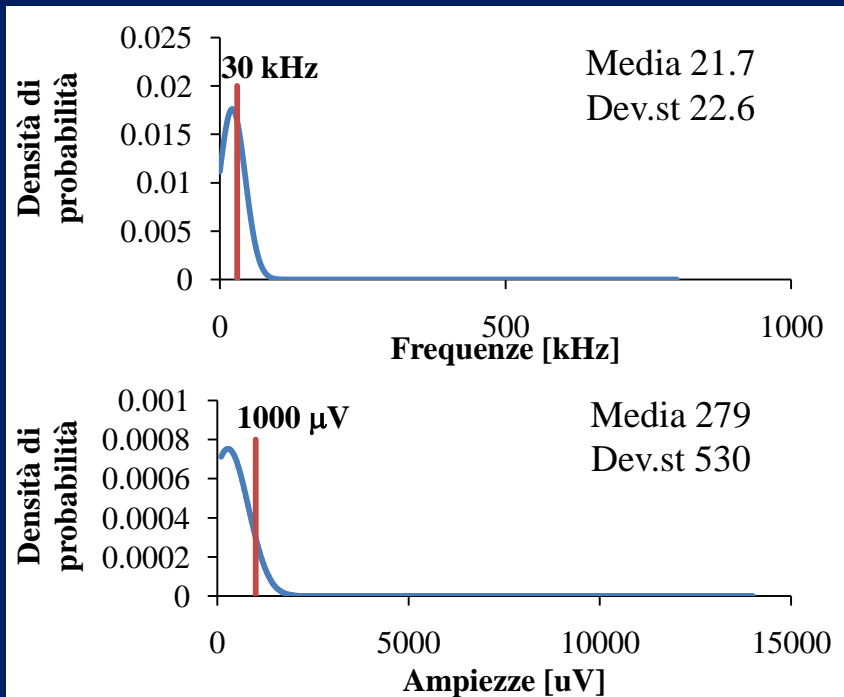
	60 km	80 km	100 km
<b>1 settimana</b>	0.0045	0.0298	0.1192
<b>2 settimane</b>	0.0132	0.0465	0.1916
<b>3 settimane</b>	0.0234	0.0717	0.2592
<b>4 settimane</b>	0.0301	0.0970	0.3251
<b>5 settimane</b>	0.0313	0.1114	0.3737
<b>6 settimane</b>	0.0313	0.1246	0.4164
<b>7 settimane</b>	0.0313	0.1299	0.4283
<b>8 settimane</b>	0.0313	0.1336	0.4333
<b>9 settimane</b>	0.0313	0.1341	0.4338

L'integrale di correlazione di Grassberger-Procaccia viene applicato ai dati ottenendo un comportamento da precursore delle AE solo per un raggio di indagine di 60 km. Si osserva un'inversione di comportamento della correlazione per raggi maggiori.

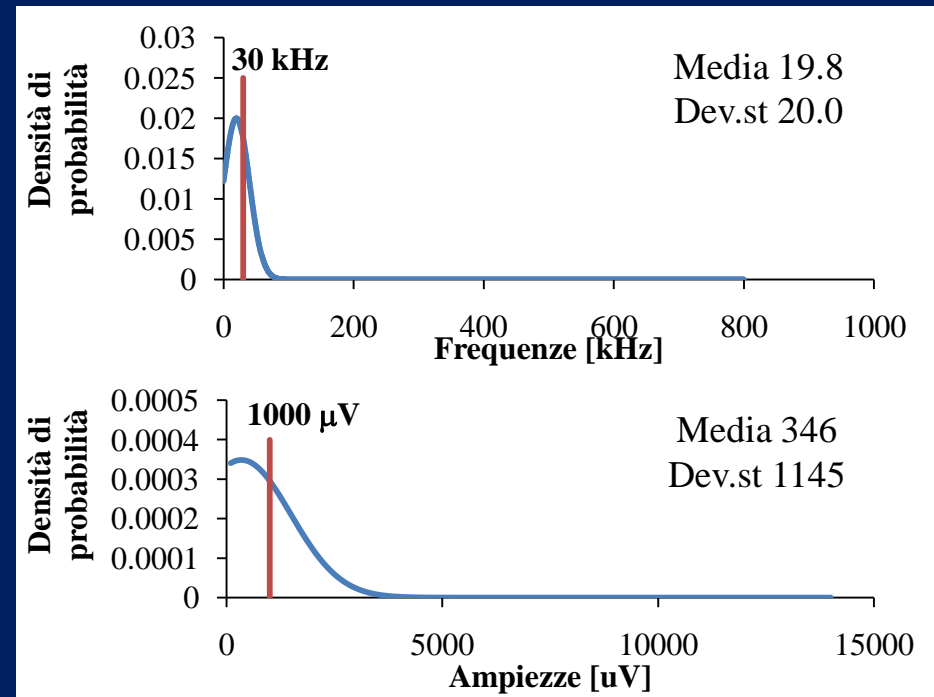
# Discriminazione dei segnali AE

Escludendo i segnali che hanno permesso la localizzazione della sorgente AE, si è analizzata la sequenza di registrazioni introducendo come input di calcolo nell'algoritmo di Grassberger-Procaccia quei segnali distinti da determinate soglie di frequenza ed ampiezza ricavate da considerazioni statistiche.

Dati 5 luglio 2011 – 5 settembre 2011



Dati 9 maggio 2011 – 16 giugno 2011



# AE con frequenze ed ampiezze discriminate

## monitoraggio 5 luglio - 5 settembre 2011

Tab. probabilità cumulata C+ AE come precursore

	60 km	80 km	100 km
<b>1 settimana</b>	0.0080	0.0290	0.0829
<b>2 settimane</b>	0.0197	0.0592	0.1969
<b>3 settimane</b>	0.0252	0.0866	0.3288
<b>4 settimane</b>	0.0364	0.1081	0.3920
<b>5 settimane</b>	0.0517	0.1248	0.4538
<b>6 settimane</b>	0.0577	0.1308	0.5267
<b>7 settimane</b>	0.0577	0.1308	0.5625
<b>8 settimane</b>	0.0577	0.1308	0.5731
<b>9 settimane</b>	0.0577	0.1308	0.5776

Tab. probabilità cumulata C- AE come aftershock

	60 km	80 km	100 km
<b>1 settimana</b>	0.0042	0.0294	0.1149
<b>2 settimane</b>	0.0117	0.0464	0.1889
<b>3 settimane</b>	0.0203	0.0681	0.2521
<b>4 settimane</b>	0.0278	0.0935	0.3142
<b>5 settimane</b>	0.0292	0.1074	0.3604
<b>6 settimane</b>	0.0292	0.1202	0.4041
<b>7 settimane</b>	0.0292	0.1253	0.4151
<b>8 settimane</b>	0.0292	0.1292	0.4213
<b>9 settimane</b>	0.0292	0.1297	0.4218

Applicando l'integrale di correlazione al segnale con frequenze inferiori ai 30 kHz ed ampiezze inferiori a 1 mV, si osserva che le emissioni acustiche tornano ad essere un precursore sismico. Le altre combinazioni mostrano un comportamento tipicamente da aftershock.