

Accordo Quadro DPC-INGV 2012-2021, All. B2 - WP 2 (Vulcani) - Task 2

**Realizzazione di un sistema di monitoraggio in tempo reale delle deformazioni del suolo dell'area vulcanica napoletana (Campi Flegrei, Vesuvio ed Ischia) tramite misure GNSS ad alta frequenza (HR-GNSS) e sviluppo di modelli statistici e numerici per la mappatura della probabilità eruttiva a breve termine della caldera dei Campi Flegrei**

Centro di Pericolosità Vulcanica (CPV)

## Sub-Task 2

### Analisi statistica e numerica per la mappatura della probabilità eruttiva a breve termine ai Campi Flegrei

Andrea Bevilacqua<sup>(1)</sup>, Abani Patra<sup>(2)</sup>, E. Bruce Pitman<sup>(3)</sup>, Marcus Bursik<sup>(4)</sup>, Augusto Neri<sup>(1)</sup>, Barry Voight<sup>(5)</sup>, Franco Flandoli<sup>(6)</sup>, Prospero De Martino<sup>(7)</sup>, Flora Giudicepietro<sup>(7)</sup>, Patrizia Ricciolino<sup>(7)</sup>, Giovanni Macedonio<sup>(7)</sup>, Stefano Vitale<sup>(7,8)</sup>

- (1) *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa, Via Cesare Battisti 53, 56121, Pisa, Italy*
- (2) *Data Intensive Studies Center, Tufts University, Medford, MA, USA,*
- (3) *Department of Materials Design and Innovation, University at Buffalo, Buffalo, NY, USA,*
- (4) *Department of Earth Sciences, University at Buffalo, Buffalo, NY, USA,*
- (5) *Department of Geosciences, Pennsylvania State University, University Park, PA, USA,*
- (6) *Scuola Normale Superiore di Pisa, Piazza dei Cavalieri 7, Pisa, Italy*
- (7) *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli, Via Diocleziano 328, Napoli, Italy*
- (8) *Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse, Università di Napoli "Federico II", Via Cinthia 21, Napoli, Italy*



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile

INGV

# Introduzione e obiettivi del Sub-Task 2

L'obiettivo è la **previsione probabilistica** del tempo di raggiungimento di uno stato critico per il sistema dei Campi Flegrei basandoci sui tassi temporali dei dati GPS e sismici del periodo 2011-2020.

**Nell'ipotesi che l'andamento dei parametri di monitoraggio osservato negli ultimi dieci anni continui invariato**, abbiamo stimato:

- **quando l'attuale livello di accelerazione porterebbe il sistema ad uno stato critico** nei prossimi decenni, i.e. la *probability of failure* in 5, 10, o 25 anni dal 2020.
- **come queste stime di probabilità possono variare** in funzione del tipo di segnale, della localizzazione spaziale della stazione, e della lunghezza del record dati considerato.

# Modello di interpretazione e previsione

Il modello FFM interpreta i segnali di monitoraggio come possibili precursori, e fornisce previsioni quantitative tramite una **regressione nonlineare** dei tassi temporali  $X$  dei segnali (Voight, 1988).

$$dX/dt = AX^\alpha \text{ dove } A > 0 \text{ e } \alpha \in [1, 2.3] \text{ tipicamente (Cornelius \& Voight, 1995).}$$

In questo studio abbiamo utilizzato una versione probabilistica del modello FFM, denominata pFFM (Bevilacqua et al., 2019), in grado di rappresentare alcune sorgenti di incertezza dei segnali reali attraverso:

- un **white noise** nelle equazioni, ovvero perturbazioni casuali caratteristiche del sistema;
- una **simulazione MC dell'esponente  $\alpha$**  che definisce la curvatura dei tassi temporali registrati in un range di variazione caratteristico.

Da un numero elevato di plausibili segnali futuri, si ottengono distribuzioni di **incertezza** per il failure time.

Il software pFFM scritto utilizzando il linguaggio *R* verrà consegnato come prodotto scientifico.

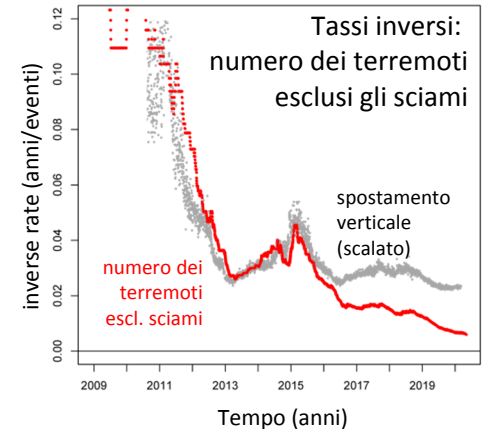
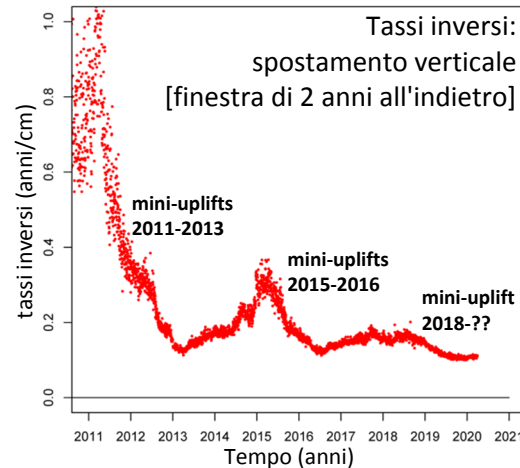
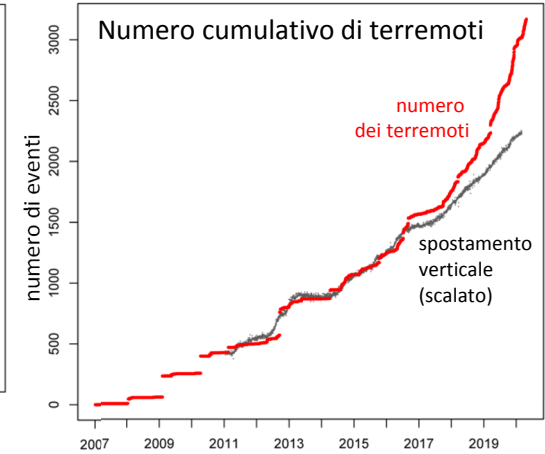
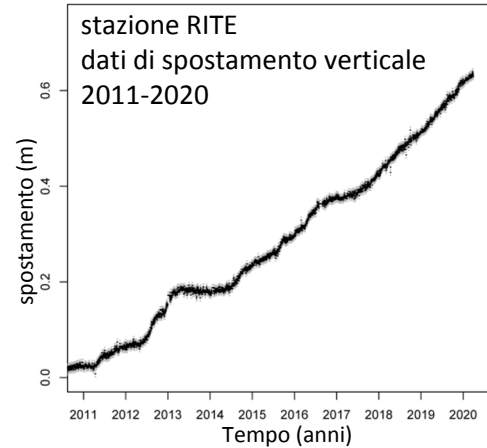
# Deformazione del suolo e numero degli eventi sismici

Abbiamo analizzato :

- **Serie giornaliera degli spostamenti GPS** da 1/2009 a 3/2020 in 11 stazioni diverse.
- **Catalogo dei terremoti** da 1/2007 a 7/2020 istante temporale e magnitudo ( $M_d$ ).

I tassi di spostamento del suolo e numero cumulativo di terremoti sono **accoppiati tra loro fino al 2016** (Chiodini et al., 2017)

Dopo il 2016 il numero dei terremoti è **accelerato più rapidamente** dello spostamento del suolo.

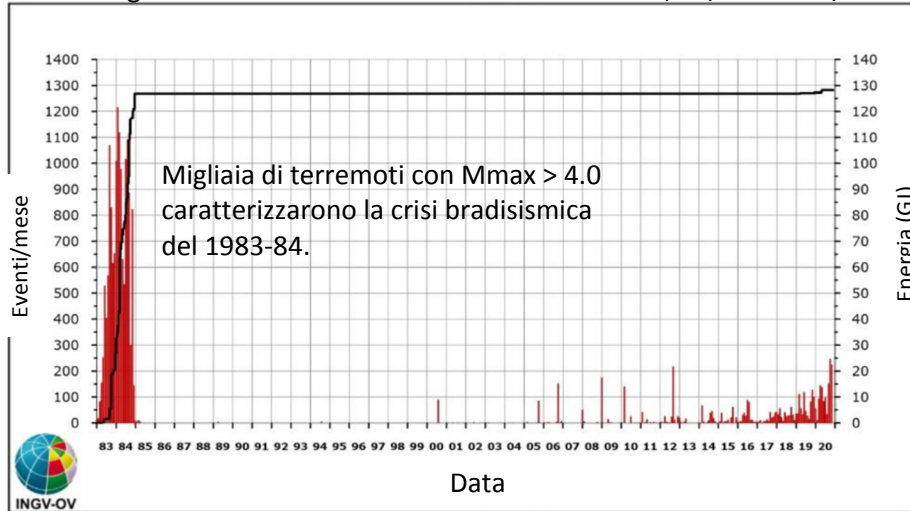


I terremoti tendono ad avvenire in **sciami**.

La magnitudo è tipicamente  $M < 2.0$ , con eventi più energetici dopo il 2014.

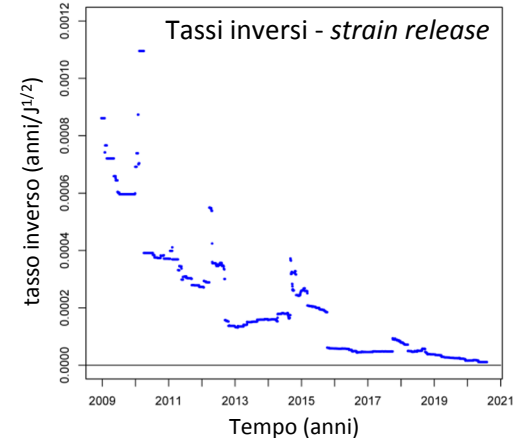
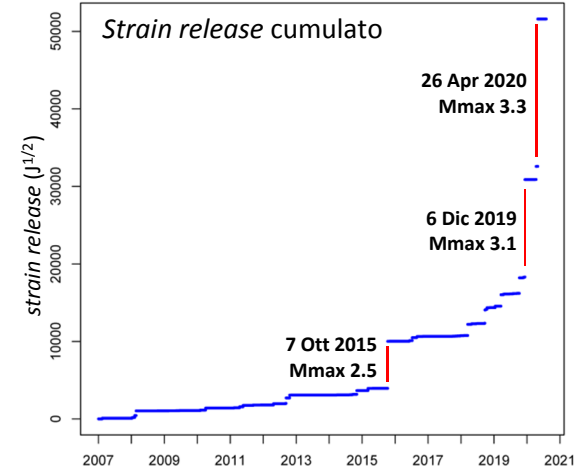
L'energia cumulata è **dominata** dai due soli eventi con  $M > 3.0$  dopo il 1984.

Energia cumulata e numero mensile dei terremoti, 01/1983 - 11/2020

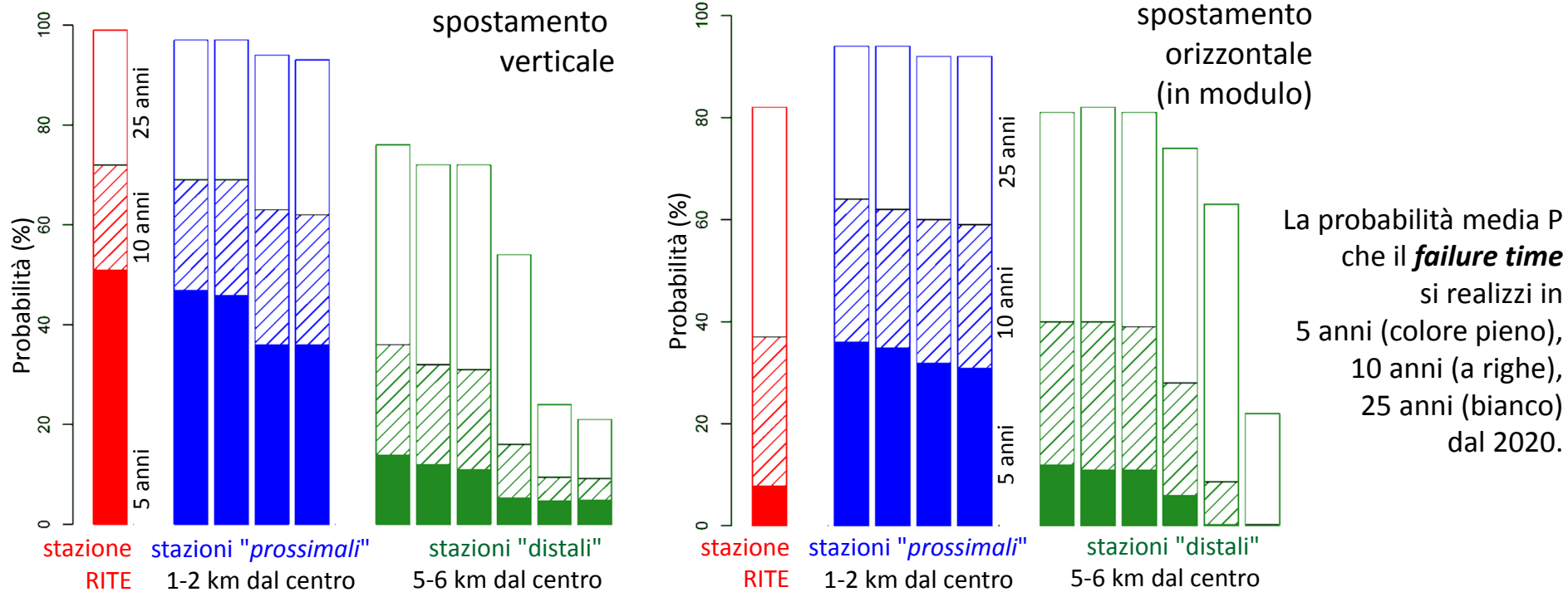


Bollettino  
INGV  
Novembre  
2020.

[www.ov.ingv.it](http://www.ov.ingv.it)



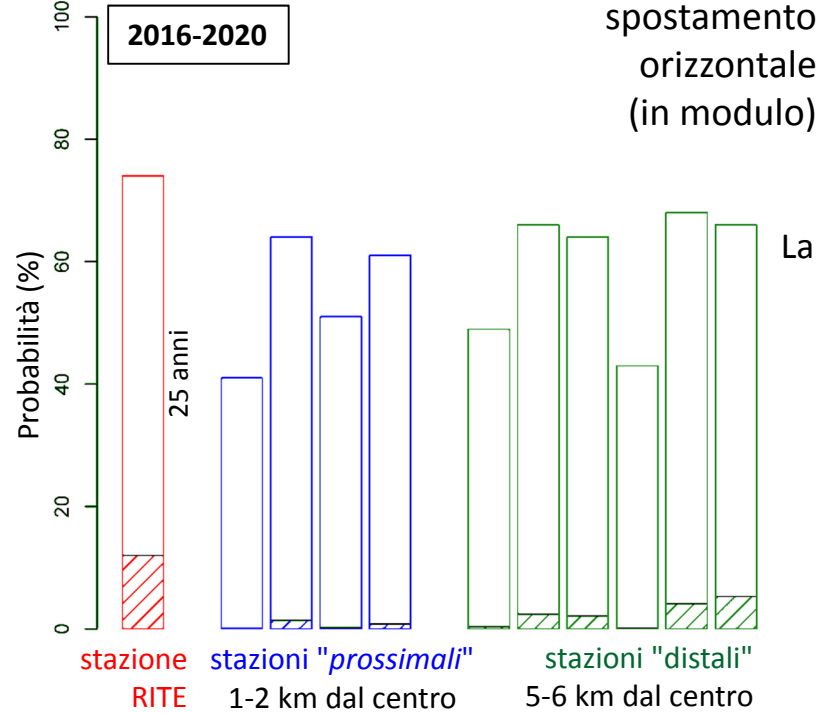
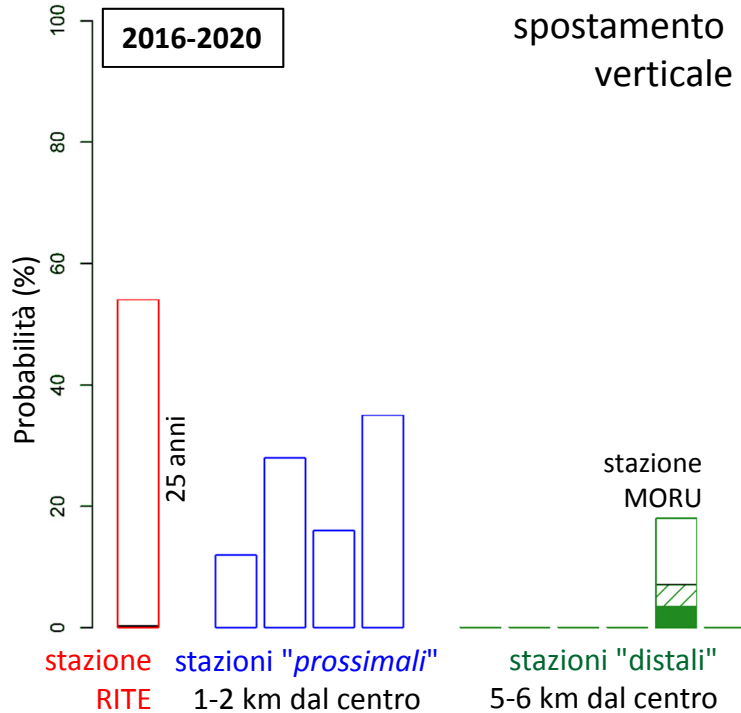
# failure times - dati di deformazione del suolo, 2011-2020



I dati di spostamento verticale alla **stazione RITE** in 2011 - 2020 producono  **$P = 51\%$  a 5 anni**.

I dati di spostamento orizzontale alle **stazioni "prossimali"** in 2011 - 2020 producono  **$P \in [31\%, 36\%]$  a 5 anni**.

# failure times- dati di deformazione del suolo, 2016-2020



La probabilità media  $P$  che il **failure time** si realizzi entro 5 e 10 anni scende significativamente, a causa del rallentamento nell'accelerazione dopo il 2016.

I dati di spostamento verticale alla **stazione RITE** in 2016 - 2020 producono  **$P = 54\%$  a 25 anni**.

I dati di spostamento orizzontale alle **stazioni "prossimali"** in 2016 - 2020 producono  **$P \in [41\%, 64\%]$  a 25 anni**.

# failure times - dati sismici

Usando dati sismici di **2011 - 2020**,

il failure time entro 5 anni è così stimato:

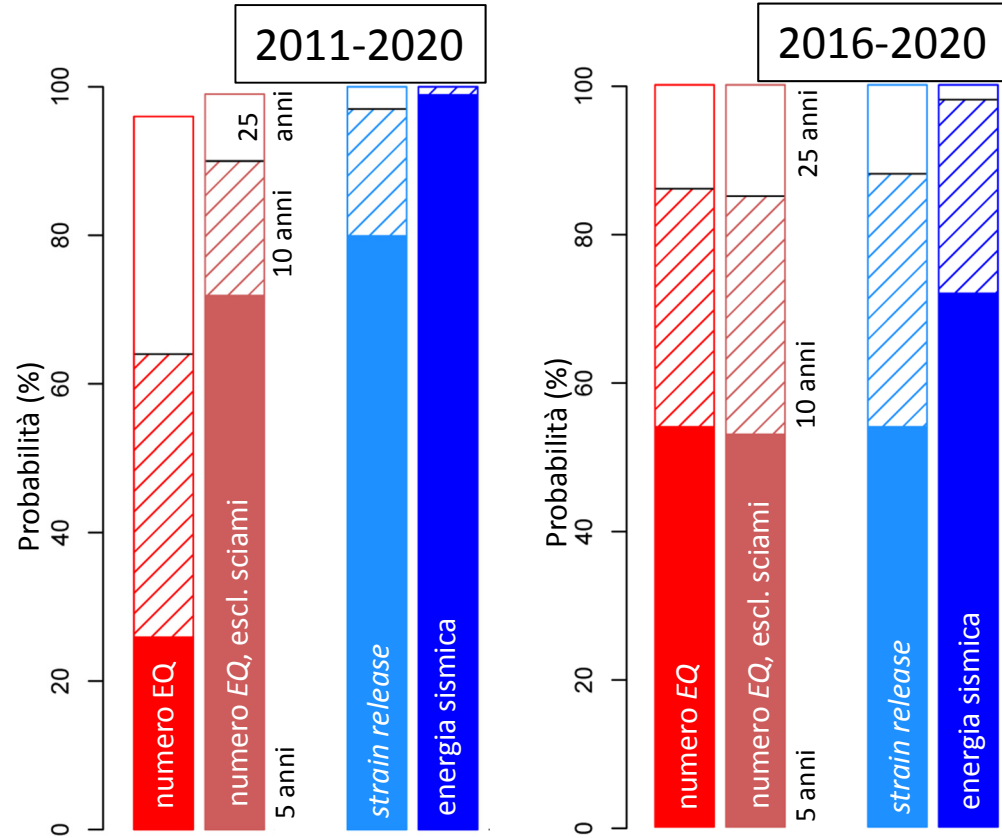
- Il **numero** dei terremoti produce  $P = 26\%$ .
- **Rimuovere gli sciami** produce  $P = 72\%$ .
- Lo **strain release** produce  $P = 80\%$ .
- L'**energia sismica** produce  $P = 99.5\%$ .

Invece, usando i dati sismici di **2016 - 2020**,

il failure time entro 5 anni è così stimato:

- Il **numero** dei terremoti produce  $P = 54\%$ .
- **Rimuovere gli sciami** produce  $P = 53\%$ .
- Lo **strain release** produce  $P = 54\%$ .
- L'**energia sismica** produce  $P = 72\%$ .

L'energia sismica è fortemente dominata dai tre eventi più forti e quindi probabilmente meno affidabile delle altre stime.



La probabilità media  $P$  che il failure time si realizzi in 5 anni (colore pieno), 10 anni (a righe), 25 anni (bianco) dal 2020.



# Conclusioni ed ulteriori studi in corso

Il modello pFFM rappresenta uno strumento quantitativo per analizzare i tassi di variazione dei dati di **monitoraggio multiparametrici**. In questo caso si sono analizzati i trend osservati su **scala pluriennale**.

Sotto l'ipotesi che **l'andamento osservato negli ultimi anni continui**, si è stimata la probabilità media  $P$  che il *failure time* sia raggiunto al variare del tipo di segnale, della posizione della stazione, e della lunghezza del record.

I tassi di **SPOSTAMENTO DEL SUOLO** hanno diminuito la loro accelerazione dopo il 2016, diventando quasi costanti. I dati di max. spostamento in 2016-2020 producono comunque  $P$  significative a 25 anni dal 2020.

I tassi della **ATTIVITÀ SISMICA** sono inferiori a quelli del 1983-84, ma l'accelerazione non è calata dopo il 2016. I dati sul numero di eventi sismici e quelli di strain release forniscono *failure times simili fra di loro*. L'**energia sismica** è fortemente influenzata dai tre eventi più forti.

- Tipi diversi di segnale producono previsioni diverse. Lo stesso tipo di segnale fornisce risultati diversi se registrato in siti diversi, ed una **interpolazione spazio-temporale** necessita di ulteriore approfondimento.
- **Future variazioni nei dati potrebbero ancora diminuire o aumentare l'accelerazione finora osservata.** Per modellare un trend di *short-term* si dovrà utilizzare una finestra temporale appropriata.