



# UNIMORE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
MODENA E REGGIO EMILIA

DIEF - Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari

**Attualità e prospettive del sistema  
di monitoraggio integrato del sito:**

**Analisi, Interpretazione e  
Validazione dei dati**



FRANCESCO  
MANCINI



CRISTINA  
CASTAGNETTI



FRANCESCA  
GRASSI



LORIS  
VINCENZI



ELISA  
BASSOLI



FEDERICO  
PONSÌ



GHITA  
ESLAMI  
VARZANEH

**Gruppo di ricerca di Geomatica**

**Gruppo di ricerca di Tecnica delle Costruzioni**



**UNIMORE**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
MODENA E REGGIO EMILIA

- ❑ Livelli di approfondimento dei dati di un sistema di Monitoraggio

### 1. Acquisizione

- Raccolta dei dati grezzi
- Controllo strumentale e qualità iniziale

### 2. Pre-processing (o elaborazione preliminare)

- Pulizia dei dati (filtri, rimozione rumore)
- Correzioni ai dati

### 3. Analisi

- Estrazione di informazioni dai dati (statici, dinamici)
- Applicazione di metodi matematici/statistici

### 4. Interpretazione

- Individuazione di pattern, correlazioni, anomalie
- Collegamento con modelli teorici o fenomeni reali
- Integrazione e correlazione tra fonti di dati
- Preliminare Valutazione critica

### 5. Modellazione

- Costruzione di modelli (fisici, elementi finiti)
- Stima di parametri e scenari

### 6. Decisione

- Valutazione critica
- Uso operativo dei risultati (monitoraggio, allerta, progetto)
- Supporto alle decisioni



**UNIMORE**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
MODENA E REGGIO EMILIA

## Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

### Attività UNIMORE

- Servizio di **monitoraggio statico**, attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti da trasduttori di spostamento, misuratori di giunti, pendoli, estensimetri, deformometri, piezometri, termometri e stazione meteorologica;
- Servizio di **monitoraggio dinamico**, attraverso l'elaborazione di dati provenienti dalla rete accelerometrica installata sulla Torre Ghirlandina e sul Duomo;
- Servizio di **livellazione di precisione** del complesso Duomo-Torre e dei caposaldi presenti in Piazza Grande;
- Servizio di **monitoraggio da dati satellitari** per l'area circostante il Duomo e la Ghirlandina.

### 1. **Acquisizione**

- Raccolta dei dati grezzi
- Controllo strumentale e qualità iniziale

### 2. **Pre-processing (o elaborazione preliminare)**

- Pulizia dei dati (filtri, rimozione rumore)
- Correzioni ai dati

### 3. **Analisi**

- Estrazione di informazioni dai dati (statici, dinamici)
- Applicazione di metodi matematici/statistici

### 4. **Interpretazione**

- Individuazione di pattern, correlazioni, anomalie
- Collegamento con modelli teorici o fenomeni reali
- Integrazione e correlazione tra fonti di dati
- Preliminare Valutazione critica

### 5. **Modellazione**

- Costruzione di modelli (fisici, elementi finiti)
- Stima di parametri e scenari

### 6. **Decisione**

- Valutazione critica
- Uso operativo dei risultati (monitoraggio, allerta, progetto)
- Supporto alle decisioni



**UNIMORE**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
MODENA E REGGIO EMILIA

## Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

### Attività UNIMORE

- ❑ Servizio di **monitoraggio statico**, attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti da trasduttori di spostamento, misuratori di giunti, pendoli, estensimetri, deformometri, piezometri, termometri e stazione meteorologica;
- ❑ Servizio di **monitoraggio dinamico**, attraverso l'elaborazione di dati provenienti dalla rete accelerometrica installata sulla Torre Ghirlandina e sul Duomo;
- ❑ Servizio di **livellazione di precisione** del complesso Duomo-Torre e dei caposaldi presenti in Piazza Grande;
- ❑ Servizio di **monitoraggio da dati satellitari** per l'area circostante il Duomo e la Ghirlandina.

Attività del Comitato Scientifico

### 1. **Acquisizione**

- Raccolta dei dati grezzi
- Controllo strumentale e qualità iniziale

### 2. **Pre-processing (o elaborazione preliminare)**

- Pulizia dei dati (filtri, rimozione rumore)
- Correzioni ai dati

### 3. **Analisi**

- Estrazione di informazioni dai dati (statici, dinamici)
- Applicazione di metodi matematici/statistici

### 4. **Interpretazione**

- Individuazione di pattern, correlazioni, anomalie
- Collegamento con modelli teorici o fenomeni reali
- Integrazione e correlazione tra fonti di dati
- Preliminare Valutazione critica

### 5. **Modellazione**

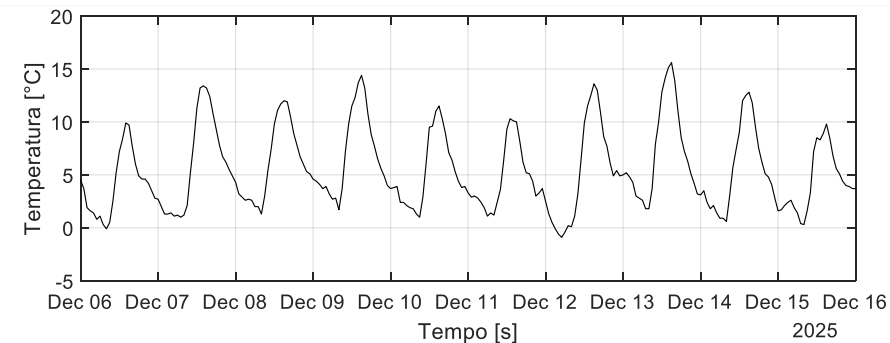
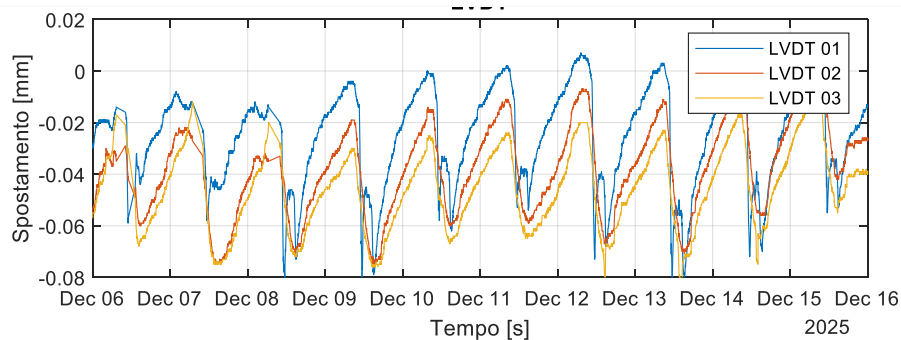
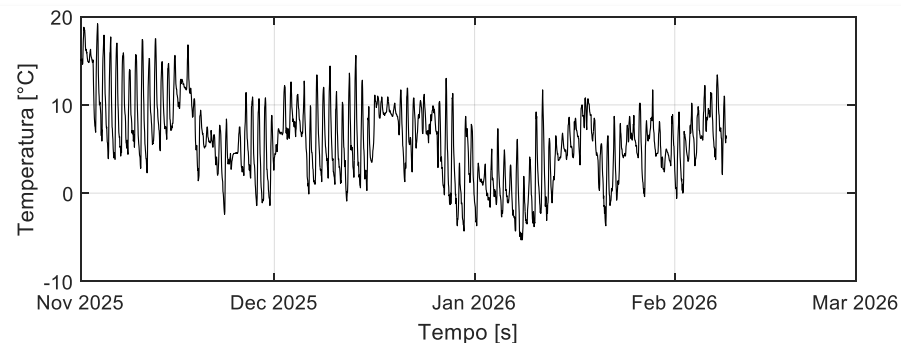
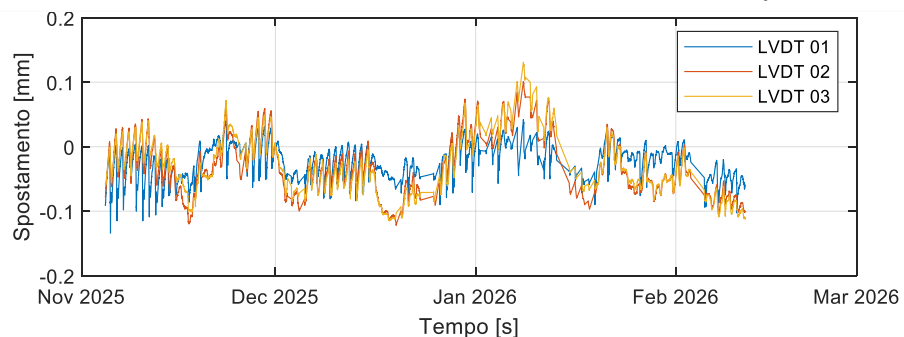
- Costruzione di modelli (fisici, elementi finiti)
- Stima di parametri e scenari

### 6. **Decisione**

- Valutazione critica
- Uso operativo dei risultati (monitoraggio, allerta, progetto)
- Supporto alle decisioni

## Dati «statici»

Dati di apertura di Fessura (altro caso studio)



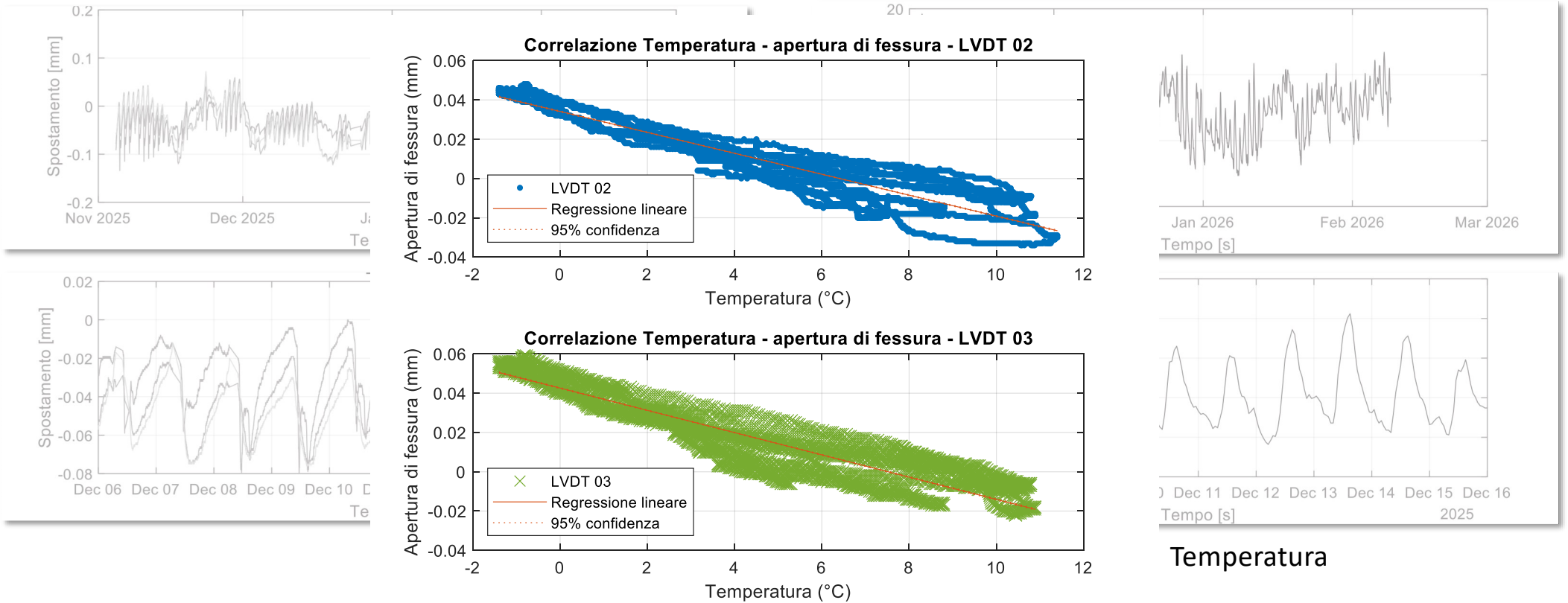
Apertura di Fessura

Temperatura

# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati «statici»

Dati di apertura di Fessura (altro caso studio)

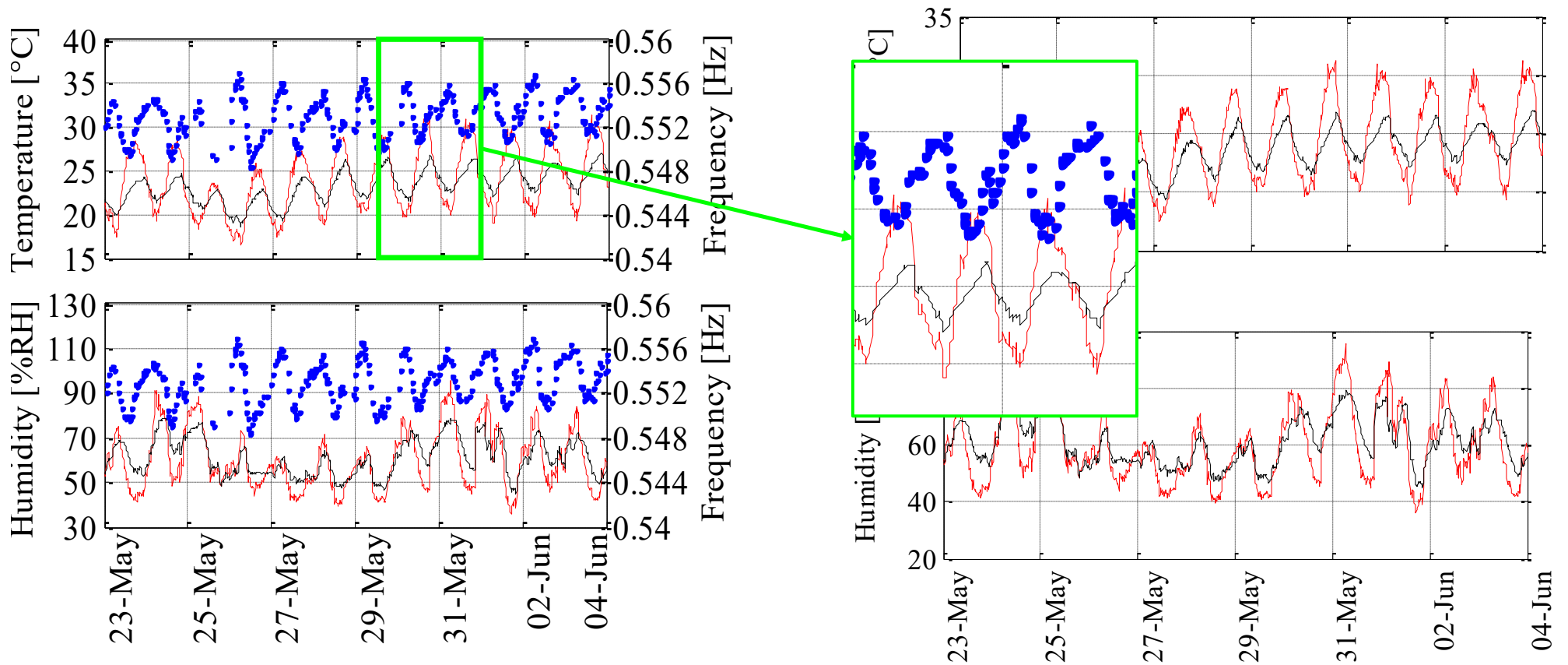


# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati dinamici

### Effetto delle condizioni ambientali sulle frequenze di vibrazione

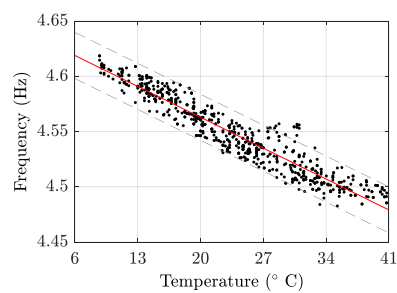
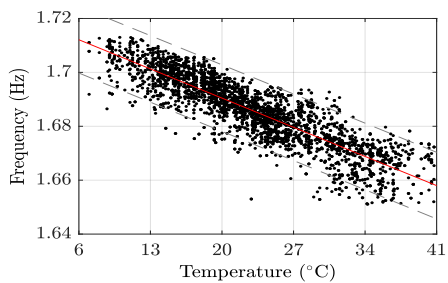
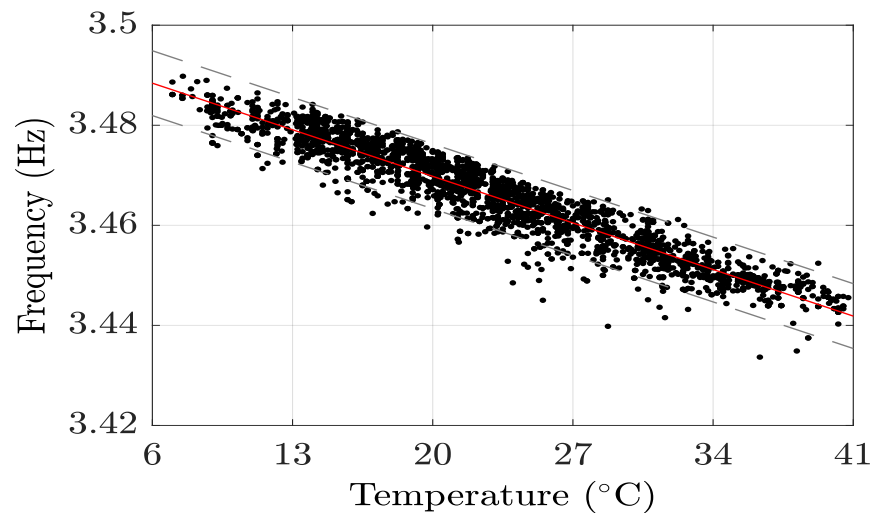
— Sensor T1 – Outdoor  
— Sensor T2 - Indoor



# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

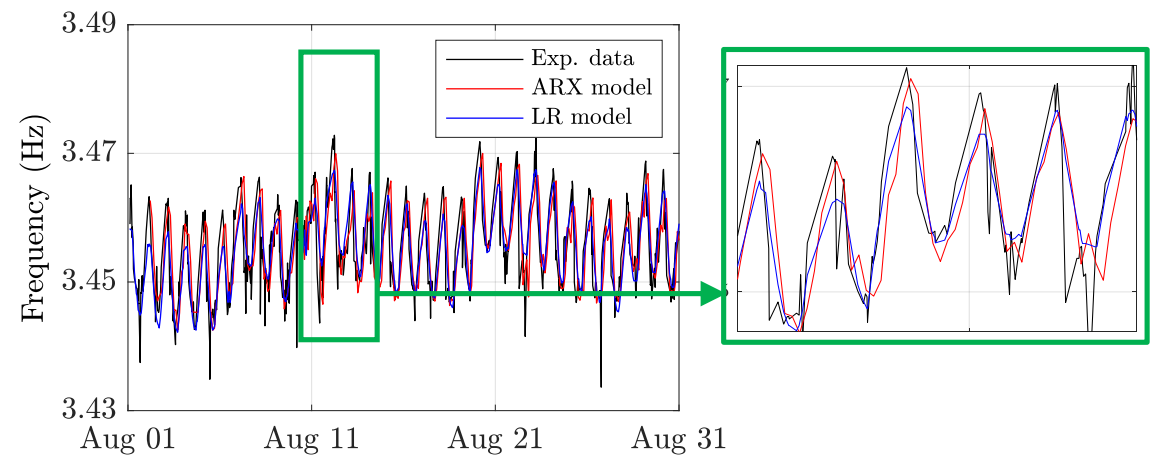
## Dati dinamici

### Effetto delle condizioni ambientali sulle frequenze di vibrazione



### Modelli ARX per la correlazione tra frequenza e temperatura

$$y(k) = \sum_{i=1}^p a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^p b_i u(k-i) + WN$$

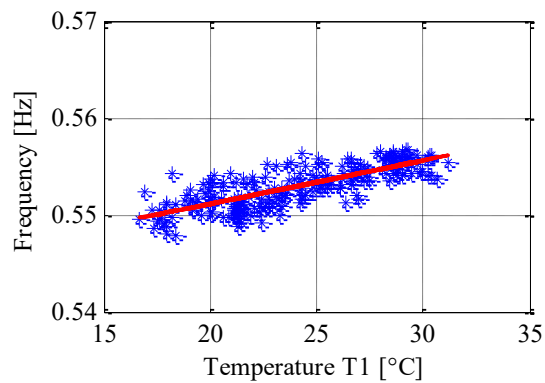
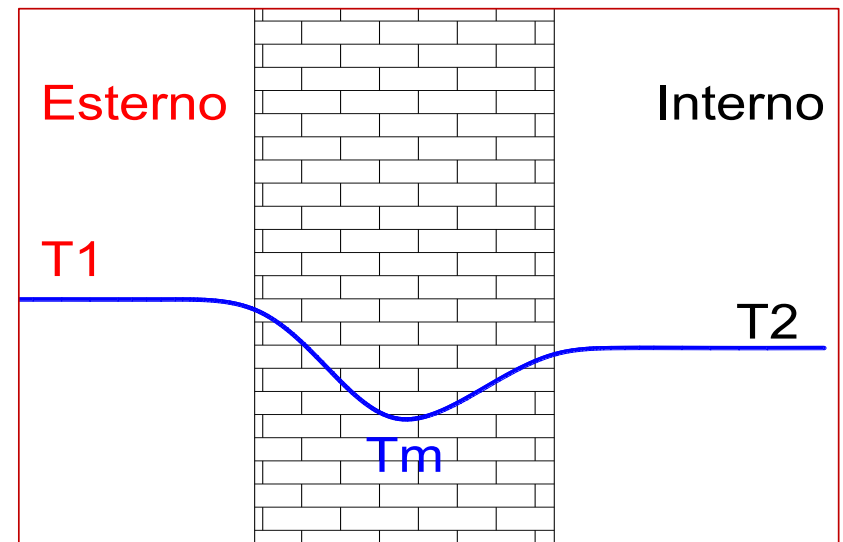
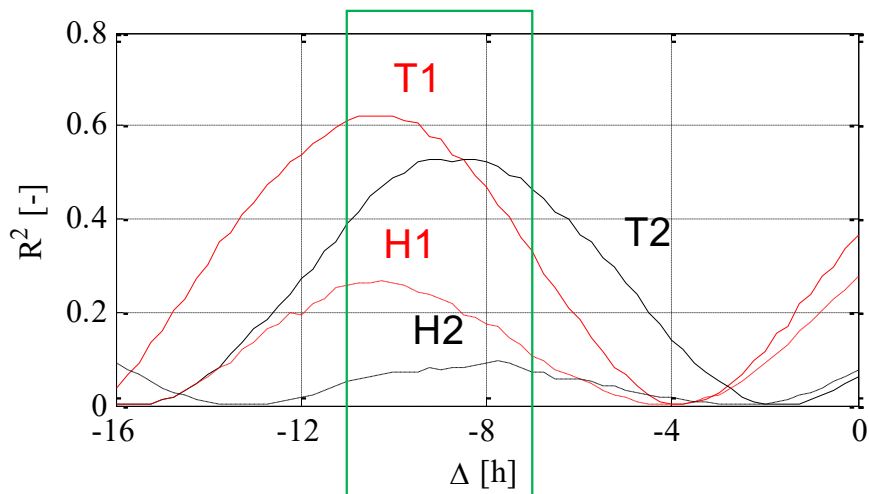


# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati dinamici

### Effetto delle condizioni ambientali sulle frequenze di vibrazione

ISO 13786:2007



$R^2$ – temp T1	82.3 %
$\Delta$ – temp T1	10.5 hours

# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

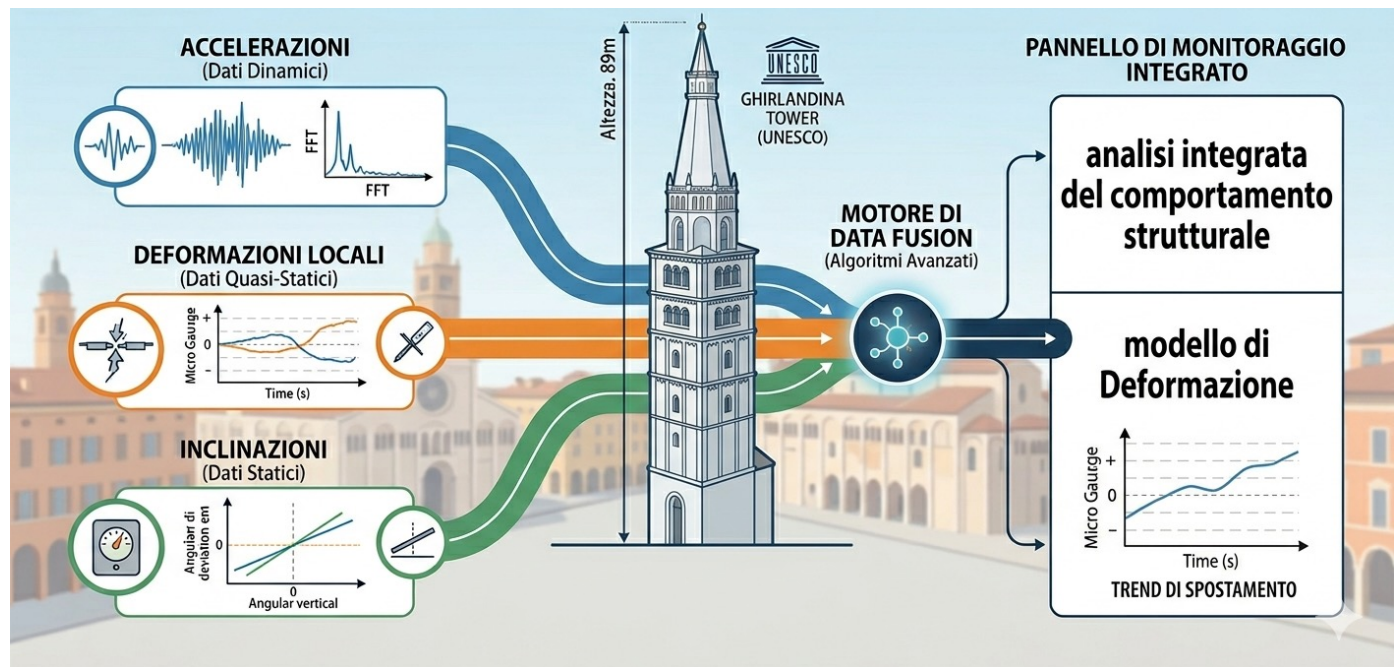
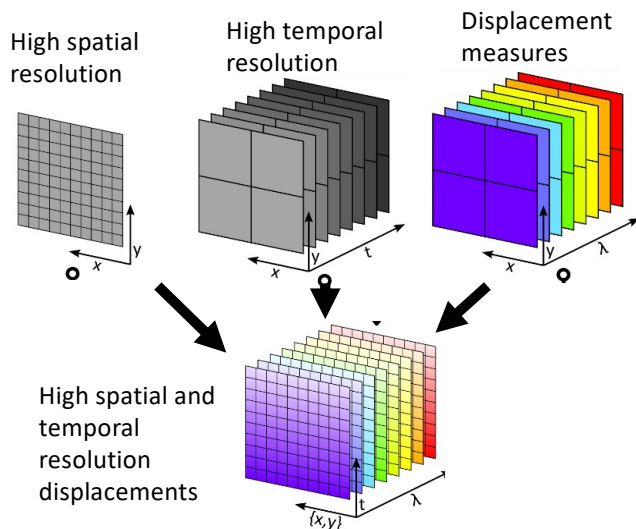
## Data Fusion

### Data Fusion (accelerazioni, inclinazioni e spostamenti)

#### Perchè tecniche di DATA FUSION?

fusione di dati provenienti da diversi sistemi di monitoraggio (integrazione di diverse strumentazioni)

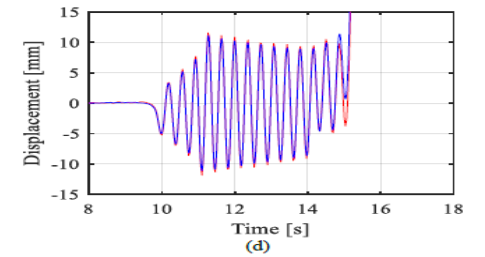
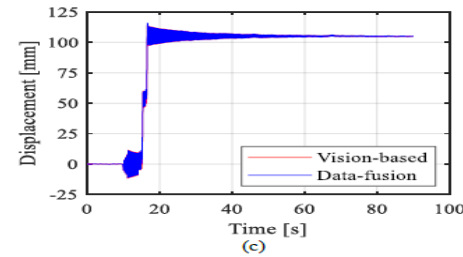
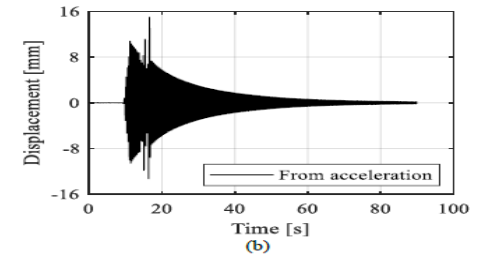
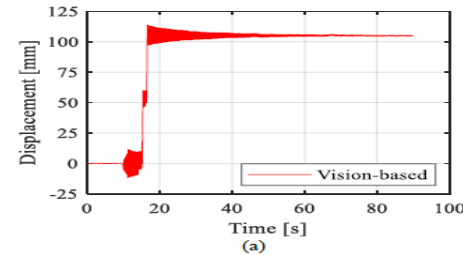
→ **Alta risoluzione spaziale e temporale, grande accuratezza nello spostamento, comprensivo di spostamento quasi statico**



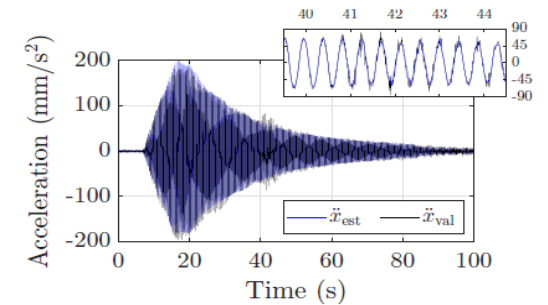
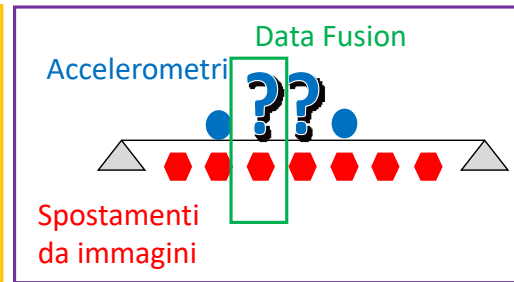
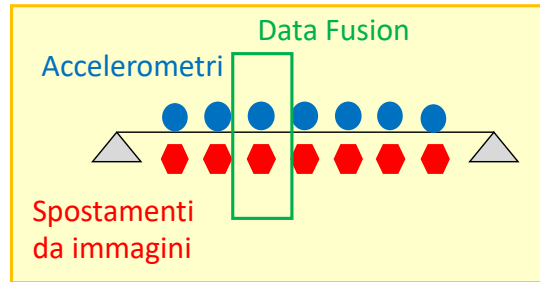
# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Data Fusion

### Esempio: Accelerazioni + GNSS



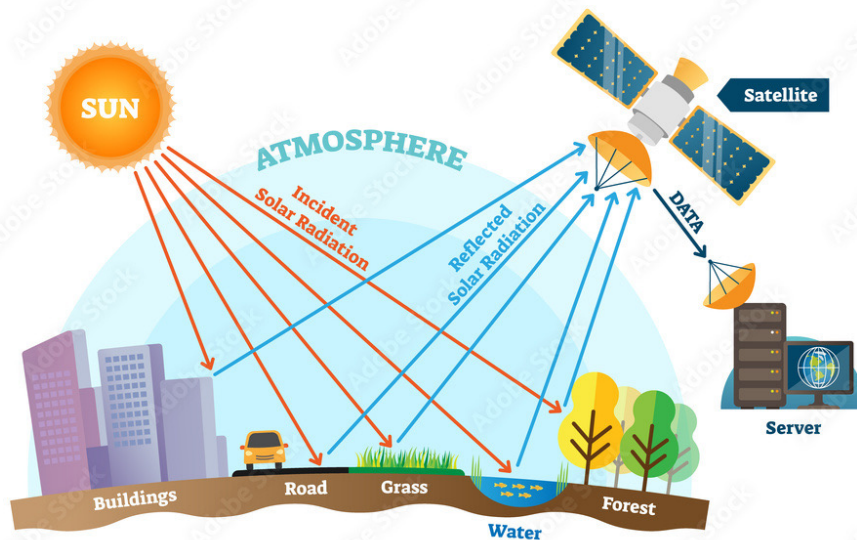
### Dati incompleti o non spazialmente coincidenti



# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI

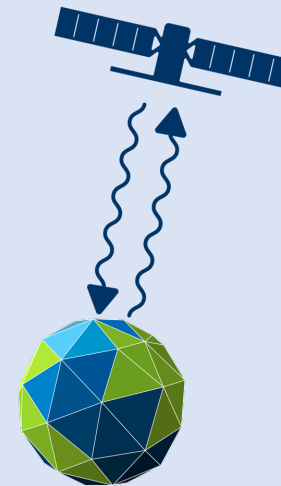
### Sistemi passivi



- **Radiometri** (misurano l'intensità della radiazione elettromagnetica in bande selezionate)
- **Spettrometri** (rilevano e analizzano il contenuto spettrale della radiazione elettromagnetica riflessa)

Questi sensori possono operare a diverse bande (visibile, infrarosso, infrarosso termico, porzioni delle microonde dello spettro elettromagnetico)

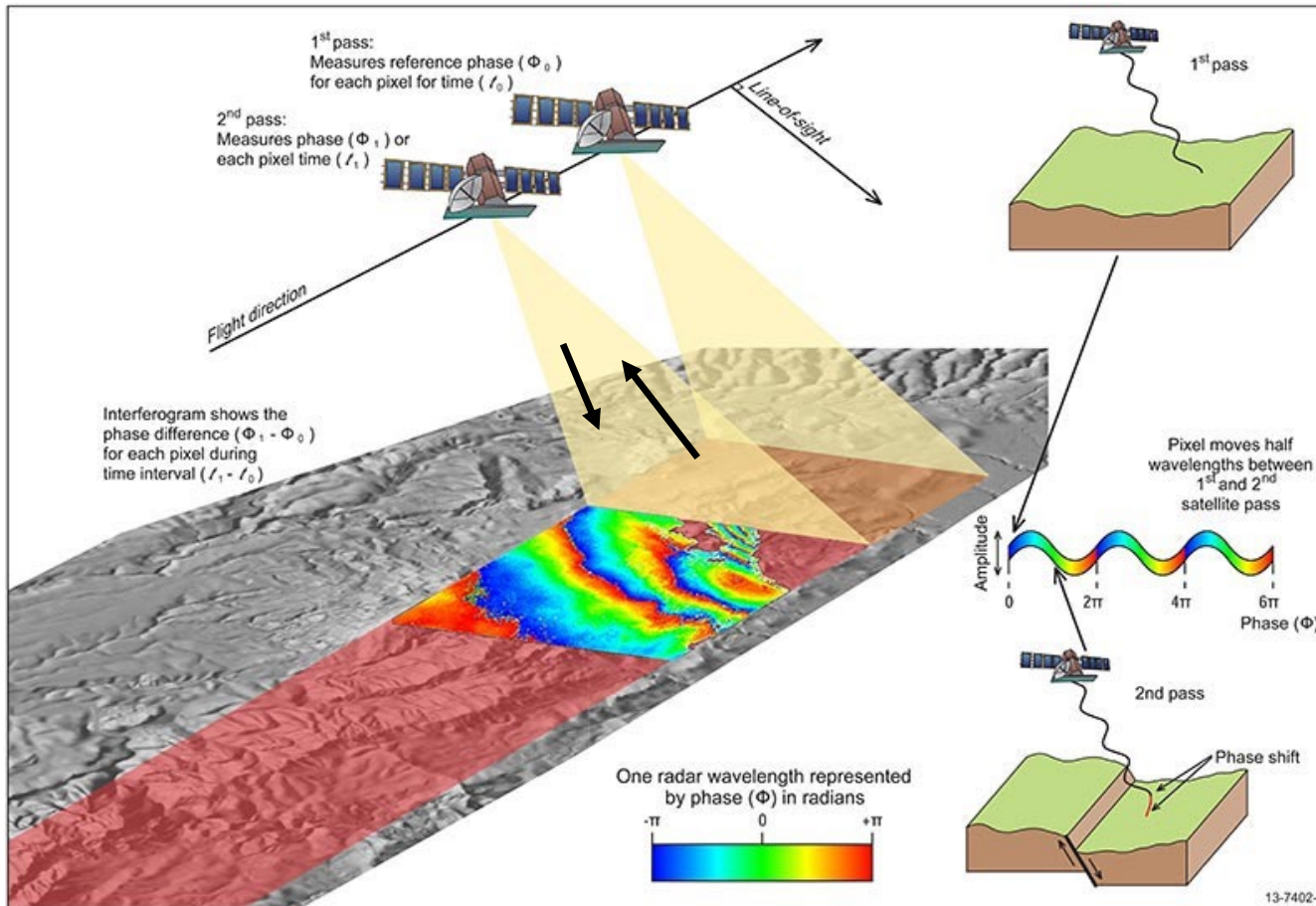
### Sistemi attivi



- **Radar** (*radio detection and ranging*) - utilizzano un segnale nelle microonde
- **Lidar** (*Light Detection and Ranging*) utilizzano un fascio coerente di luce ad una determinata lunghezza d'onda

# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI



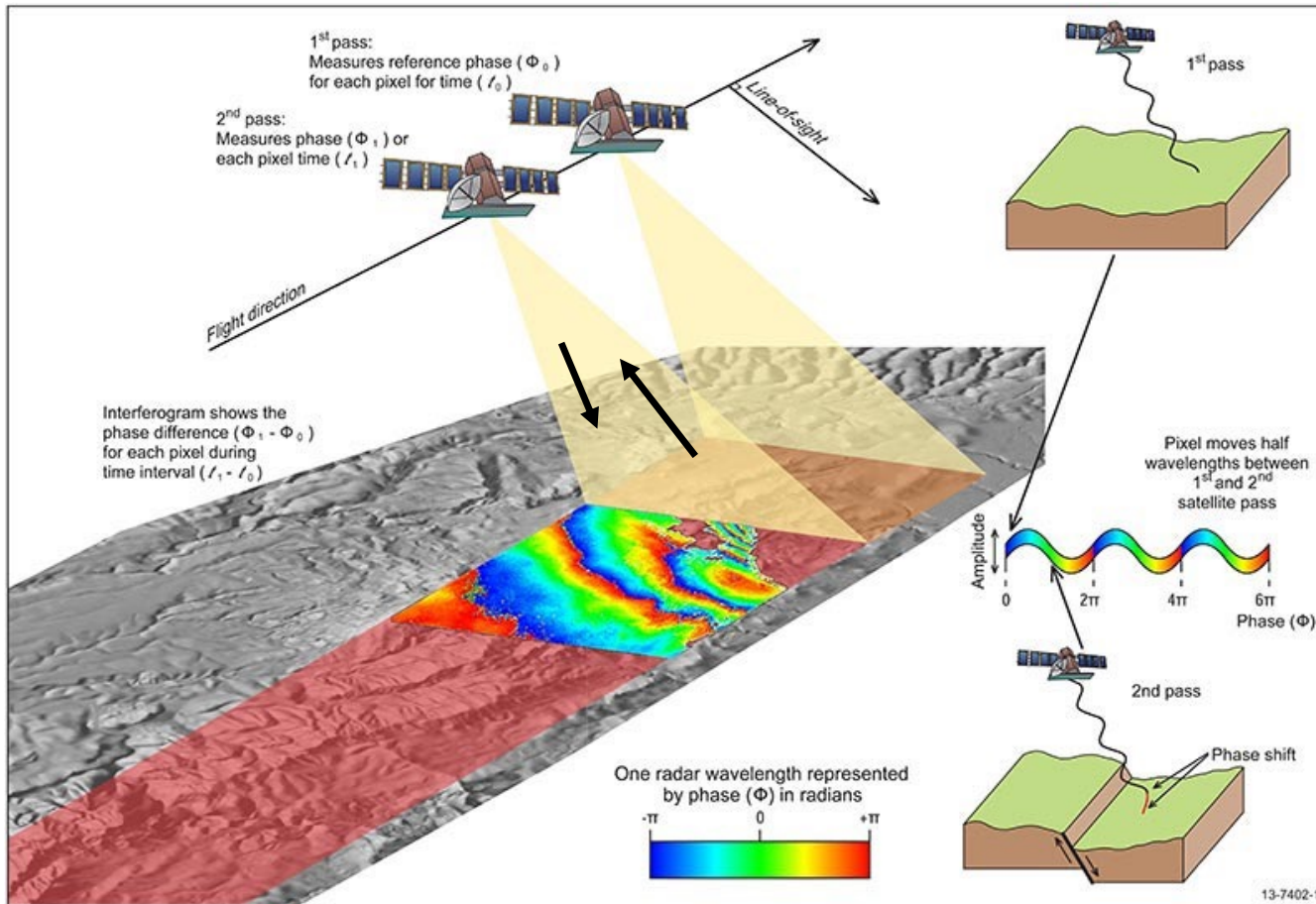
L'interferometria radar (InSAR) è una tecnica di telerilevamento che **confronta due o più immagini radar (SAR) di una stessa area**, acquisite in tempi diverse, per misurare deformazioni del terreno o strutture con precisione millimetrica.

**Principio di funzionamento: Analizza la differenza di fase tra due segnali radar riflessi.** Una differenza di fase indica che la superficie si è mossa (avvicinata o allontanata dal sensore) tra le due acquisizioni.

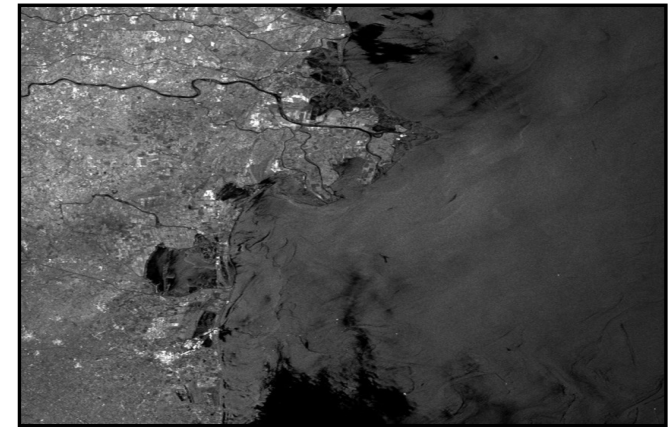
**La fase è legata soprattutto alla distanza tra satellite e bersaglio misurata lungo la linea di vista (Line of Sight, LOS)**

# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI

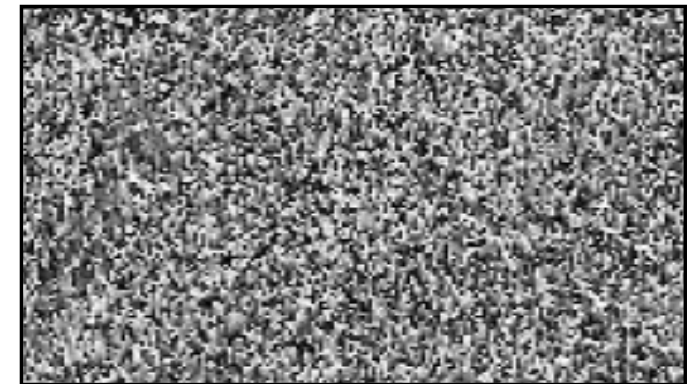


## AMPIEZZA A



Legata alla luminosità del target

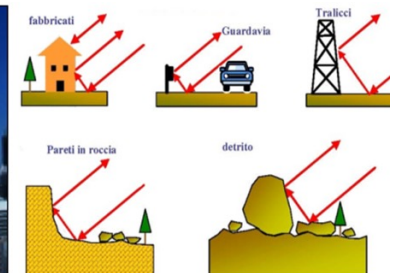
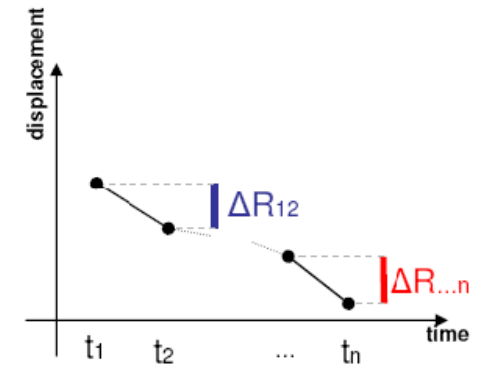
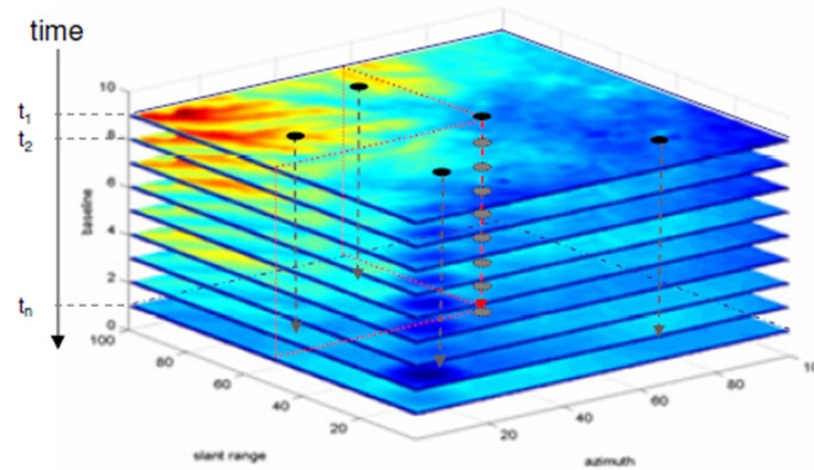
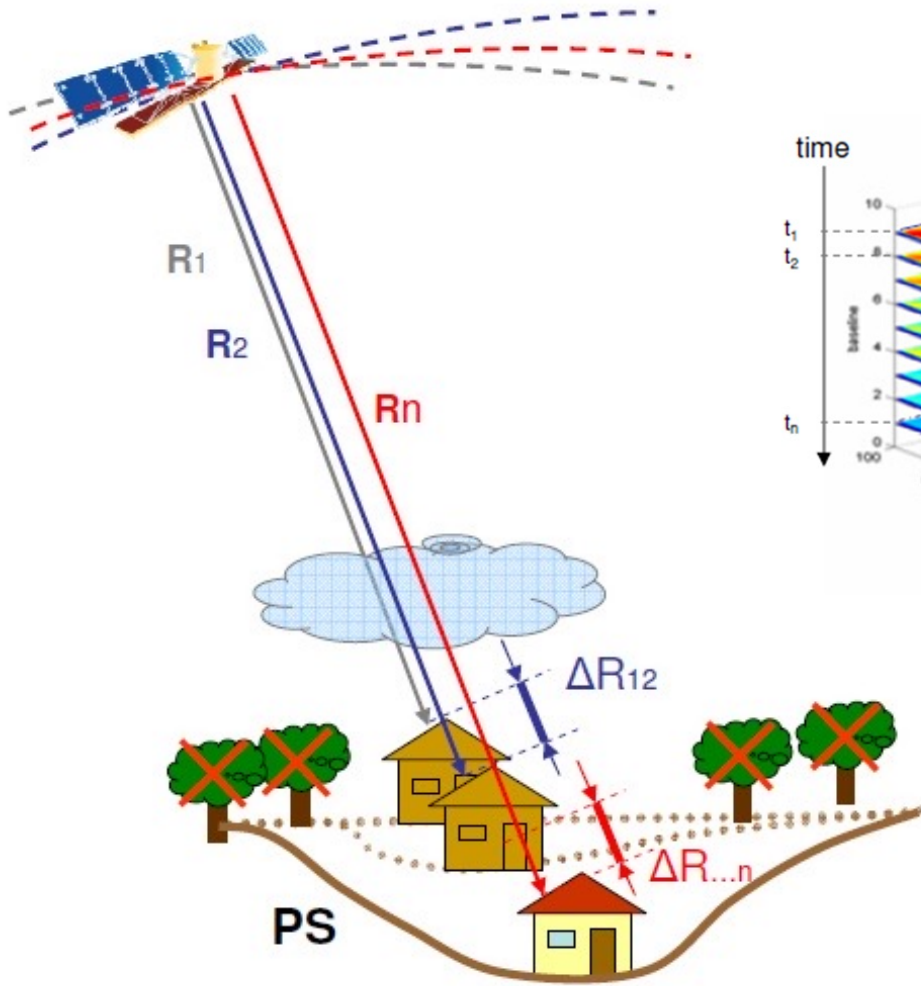
## FASE $\phi$

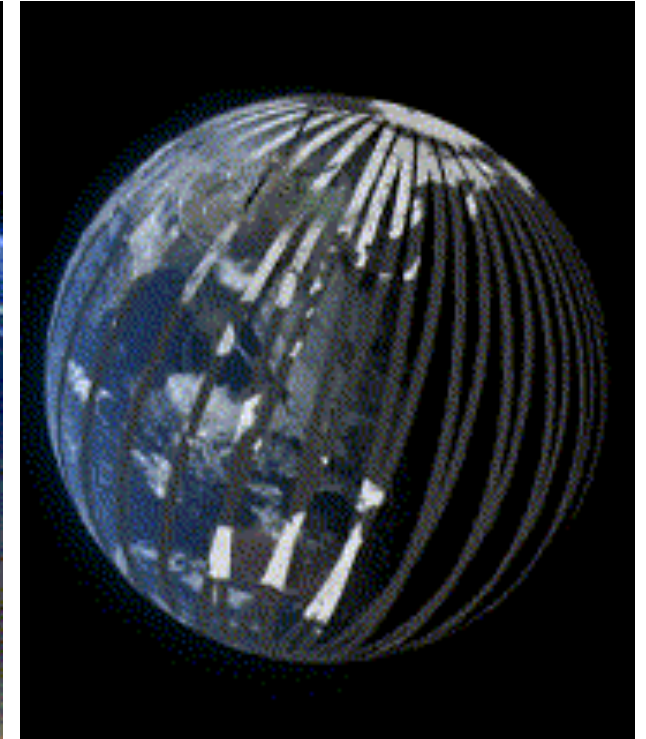
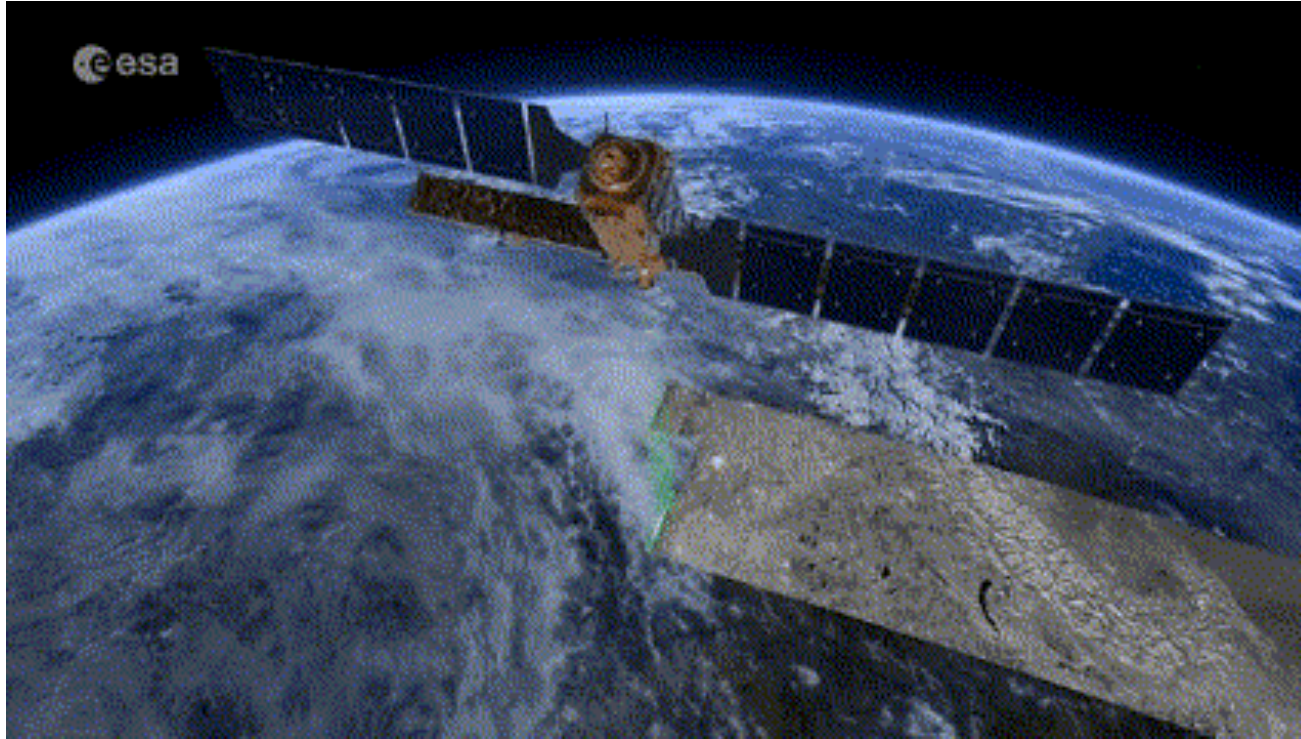


Legata alla distanza tra il sensore e il target

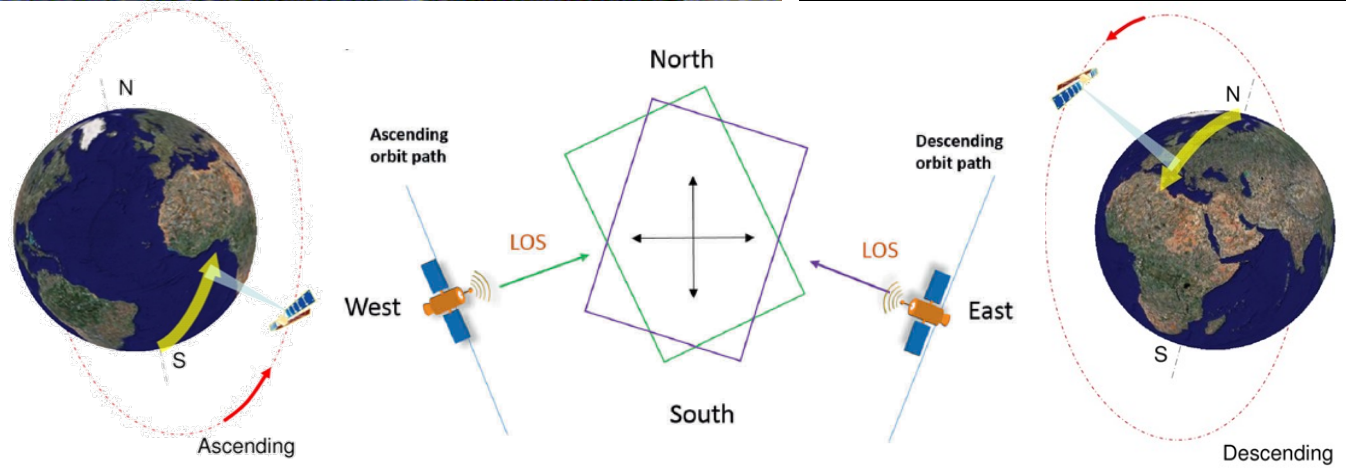
# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI





# Geometria di acquisizione





PROGRAMME OF THE EUROPEAN UNION



co-funded with

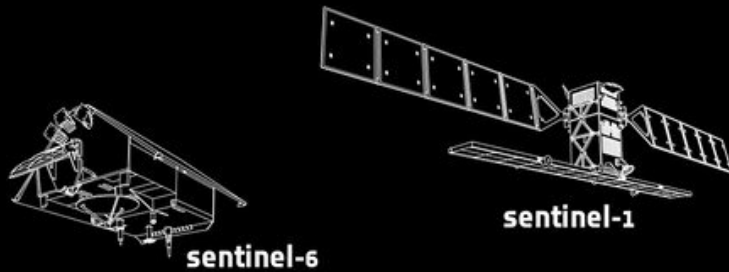


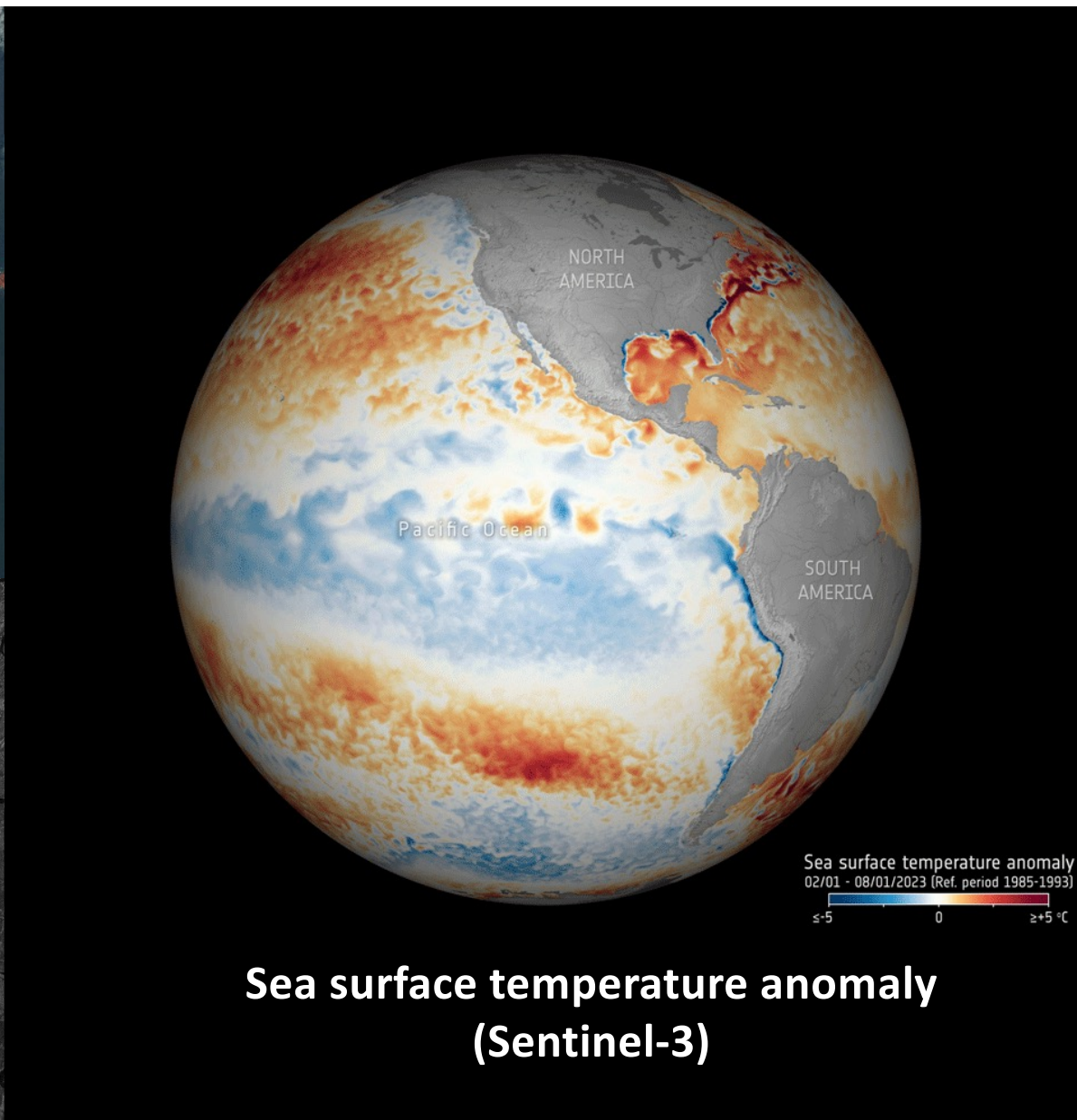
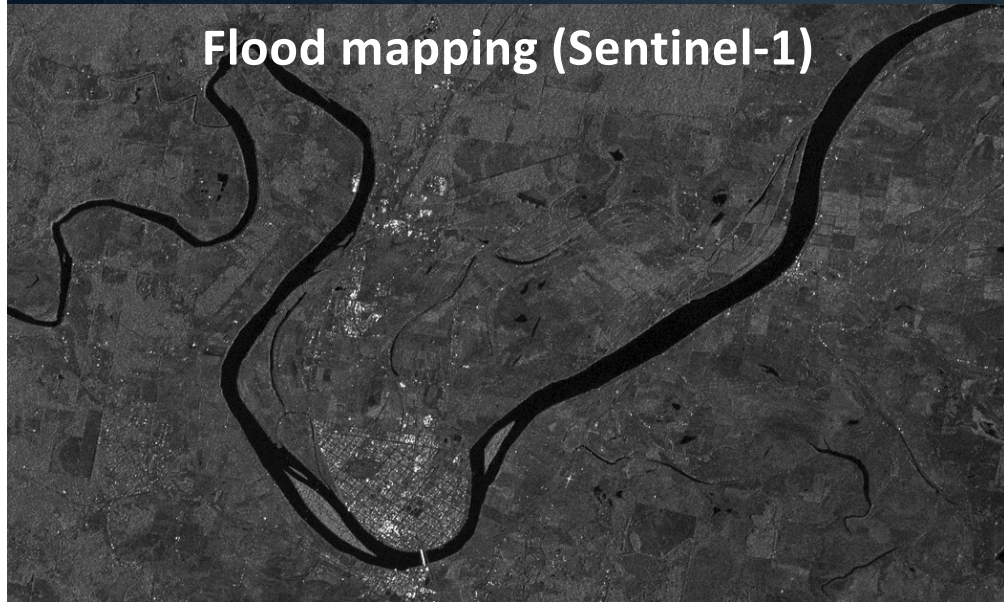
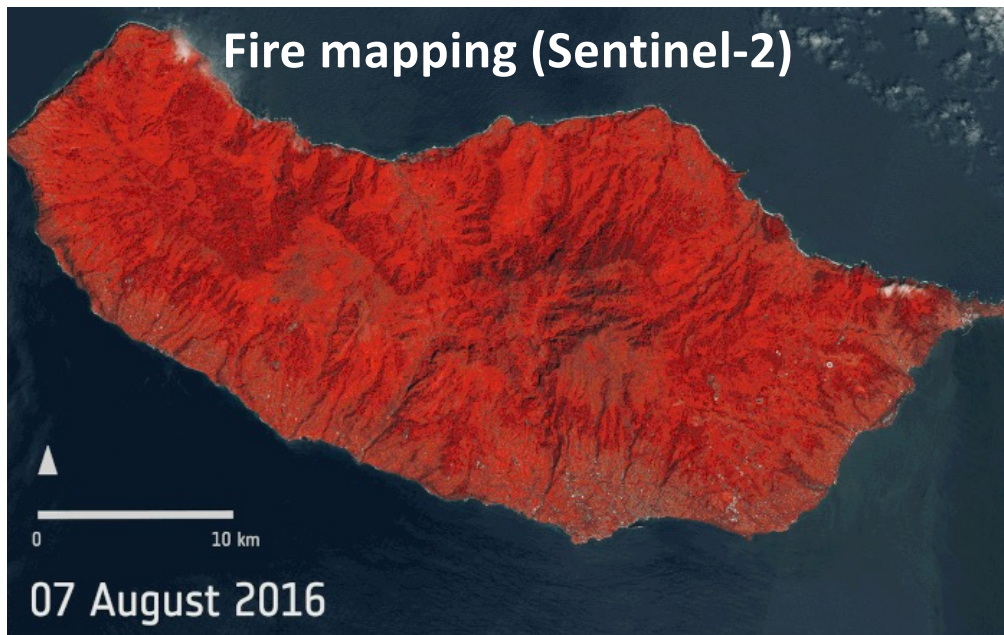
Copernicus

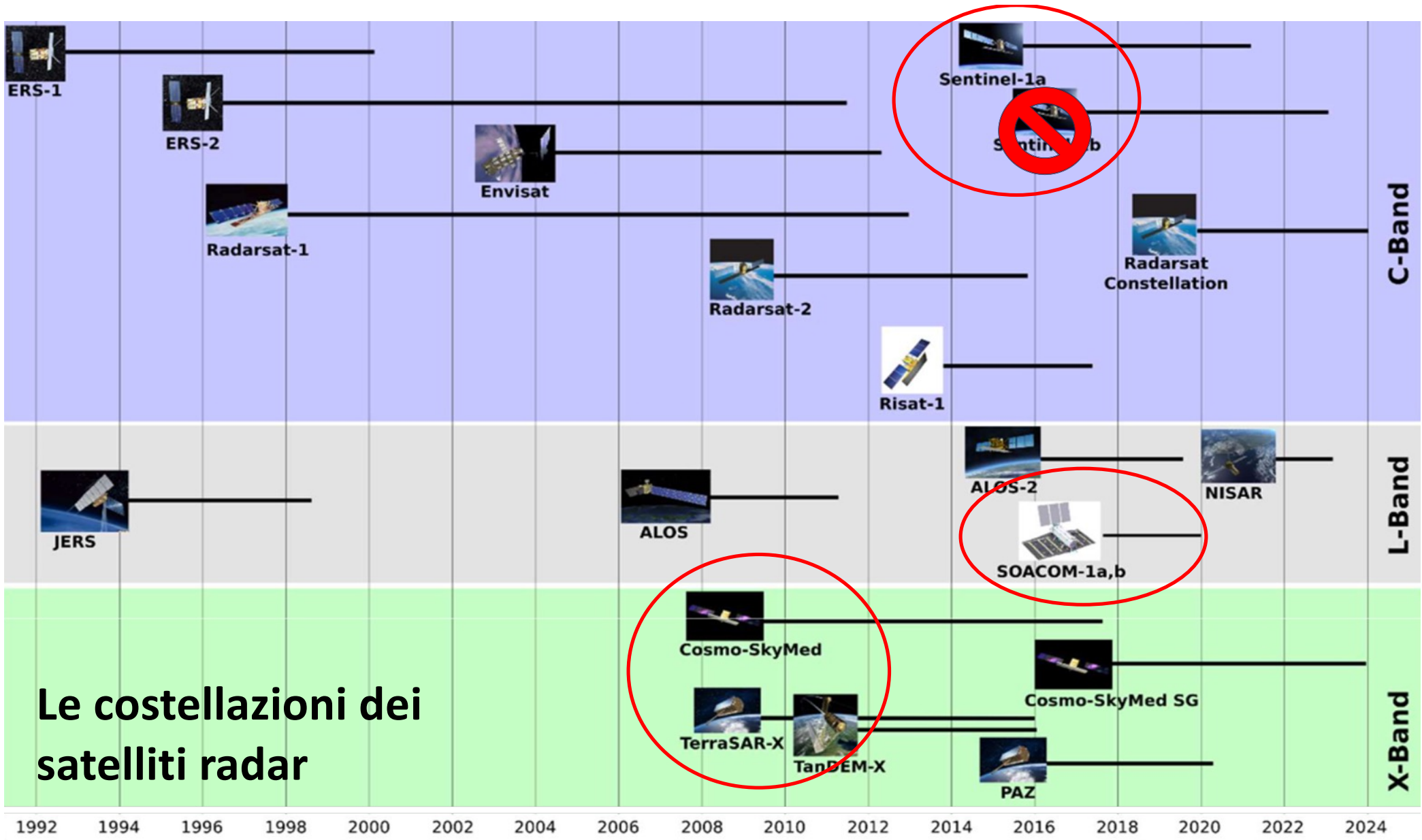
## Costellazioni SENTINEL

- **Sentinel-1:** missione radar. Monitoraggio del suolo, delle risorse naturali e gestione delle emergenze
- **Sentinel-2:** sensori multi-spettrali (13 bande) ad alta risoluzione. Monitoraggio del suolo (stato della vegetazione, incendi, uso del suolo, ecc...)
- **Sentinel-3:** missione multi-strumento (radiometri, altimetri, ...). Monitoraggio di oceani, acque, suolo e atmosfera a livello globale.
- **Sentinel-4, -5P e 5:** spettrometri. Monitoraggio della qualità dell'aria.
- **Sentinel-6:** radiometri e altimetri. Monitoraggio del livello medio marino

**Nuovi satelliti in arrivo...**







# Le costellazioni dei satelliti radar

# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI

### Missioni satelliti SAR banda X: COSMO-SkyMed

*(Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation)*

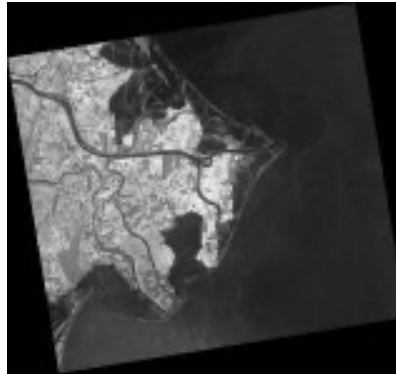
#### CSK LAUNCHES

- COSMO-1 (June 8, 2007)
- COSMO-2 (December 9, 2007)
- COSMO-3 (October 25, 2008)
- COSMO-4 (November 5, 2010)

#### CSG\* LAUNCHES

- CSG-1 (December 18, 2019)
- CSG-2 (January 31, 2022)
- CSG-3 (January 3, 2026)

\*COSMO-SkyMed Second Generation (CSG) Constellation

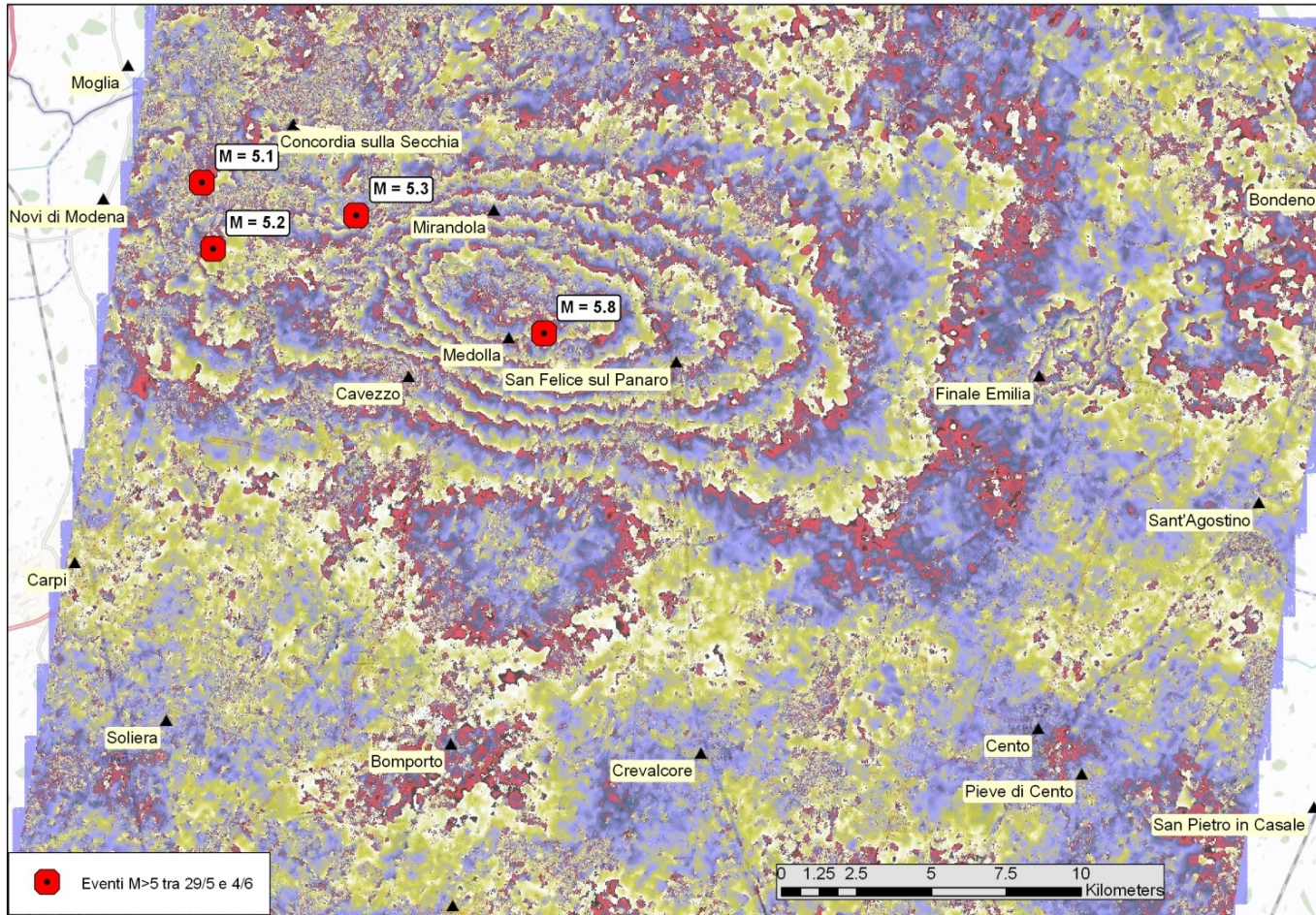


Orbit type	Sun-synchronous
Inclination	97.86°
Revolutions per day	14.8125
Orbit cycle	16 days
Eccentricity	0.00118
Orbit height	619.6 km
Incidence angle	20°-60°



# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI



## Il metodo interferometrico differenziale

### Sisma in Emilia Romagna

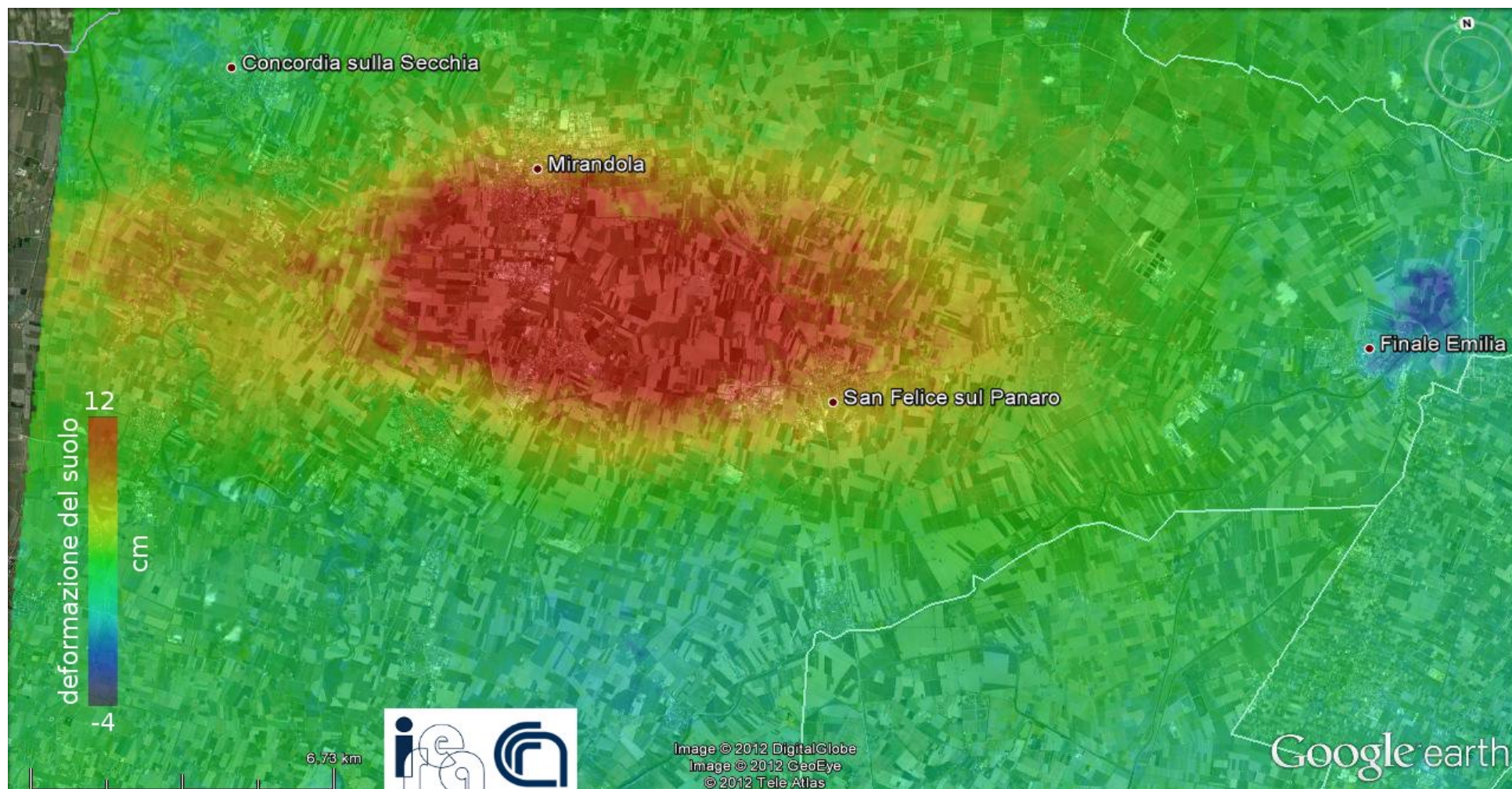
- 20 Maggio 2012, ore 02:03:53 (UTC). Evento Mw 6.1, epicentro nei pressi di Finale Emilia.
- 29 Maggio 2012, ore 07:00:03 (UTC). Evento Mw 6.0, epicentro nei pressi dei comuni di Mirandola e Medolla.

Elaborazioni di dati del satellite COSMO-SkyMed (Agenzia Spaziale Italiana)

- Le **frange colorate concentriche** rappresentano variazioni di fase → quindi **spostamenti del terreno**.
- Ogni “ciclo” di colore (frangia) corrisponde a uno spostamento di 1 lunghezza d’onda (**alcuni centimetri lungo la LOS**).

# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI



# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

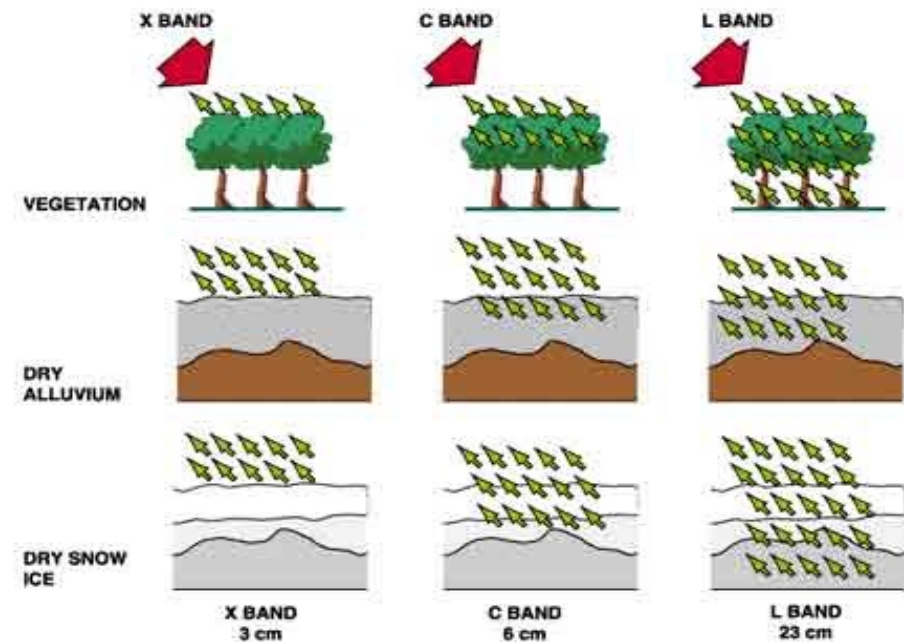
## Dati SATELLITARI

### Vantaggi:

- 1) Rispetto ai metodi di monitoraggio che sfruttano sensori e cablaggi in situ, l'**interferometria radar satellitare non necessita di componenti montate sulla singola struttura** e quindi, in principio, consente il **monitoraggio di qualunque struttura situata nella zona coperta dalle immagini SAR**.
- 2) Acquisizione di giorno e di notte e con qualsiasi condizione atmosferica (le microonde penetrano le nuvole - sotto i 10 GHz).
- 3) Capacità di penetrare la vegetazione e il suolo proporzionale alla lunghezza d'onda
- 4) La **disponibilità di immagini SAR storiche consente, di effettuare un monitoraggio «del passato»**, permettendo di ricostruire e analizzare l'evoluzione della struttura nel periodo coperto dai dati.

### Precisione:

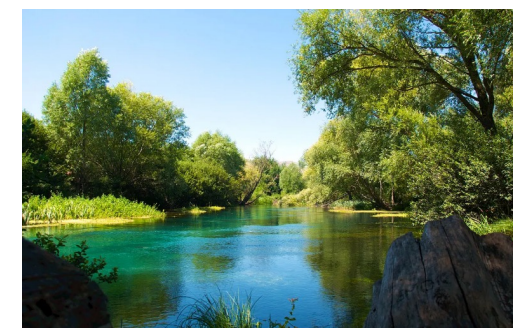
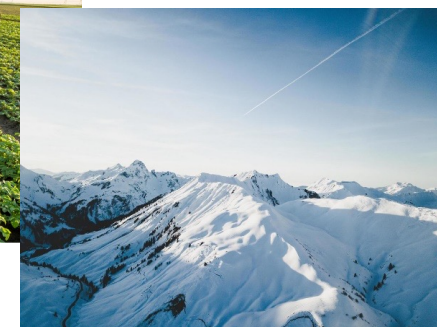
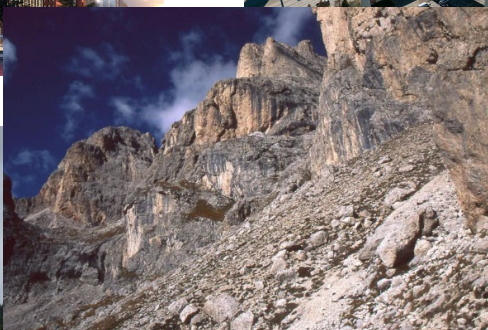
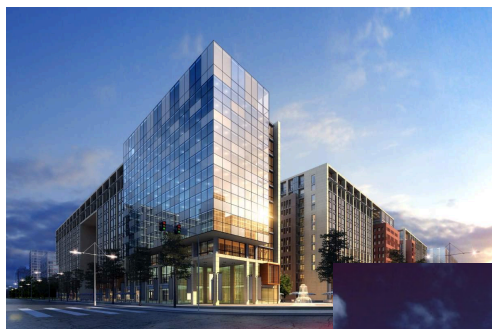
È in grado di rilevare spostamenti millimetrici o sub-millimetrici.



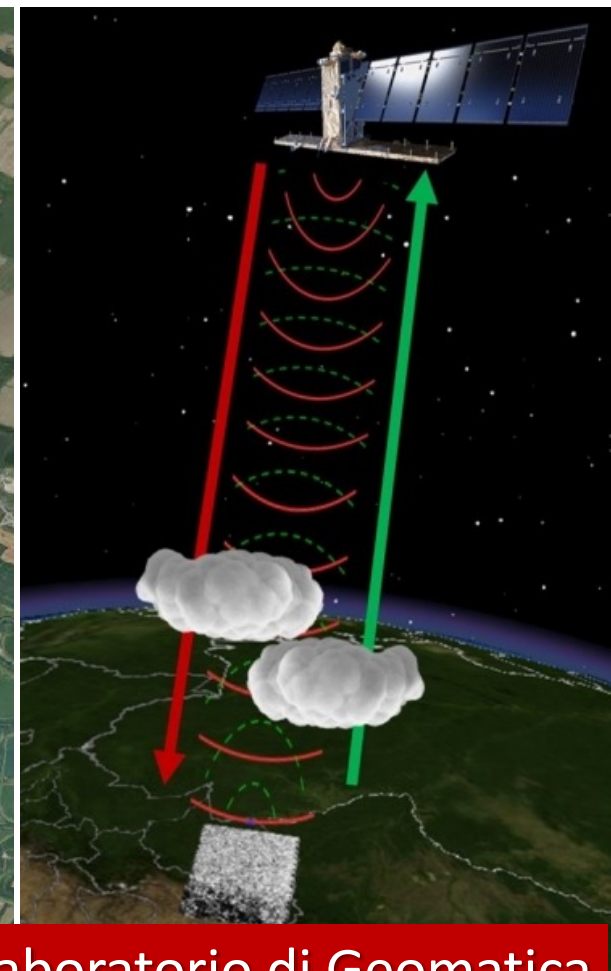
# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI

### Persistent Scatterers



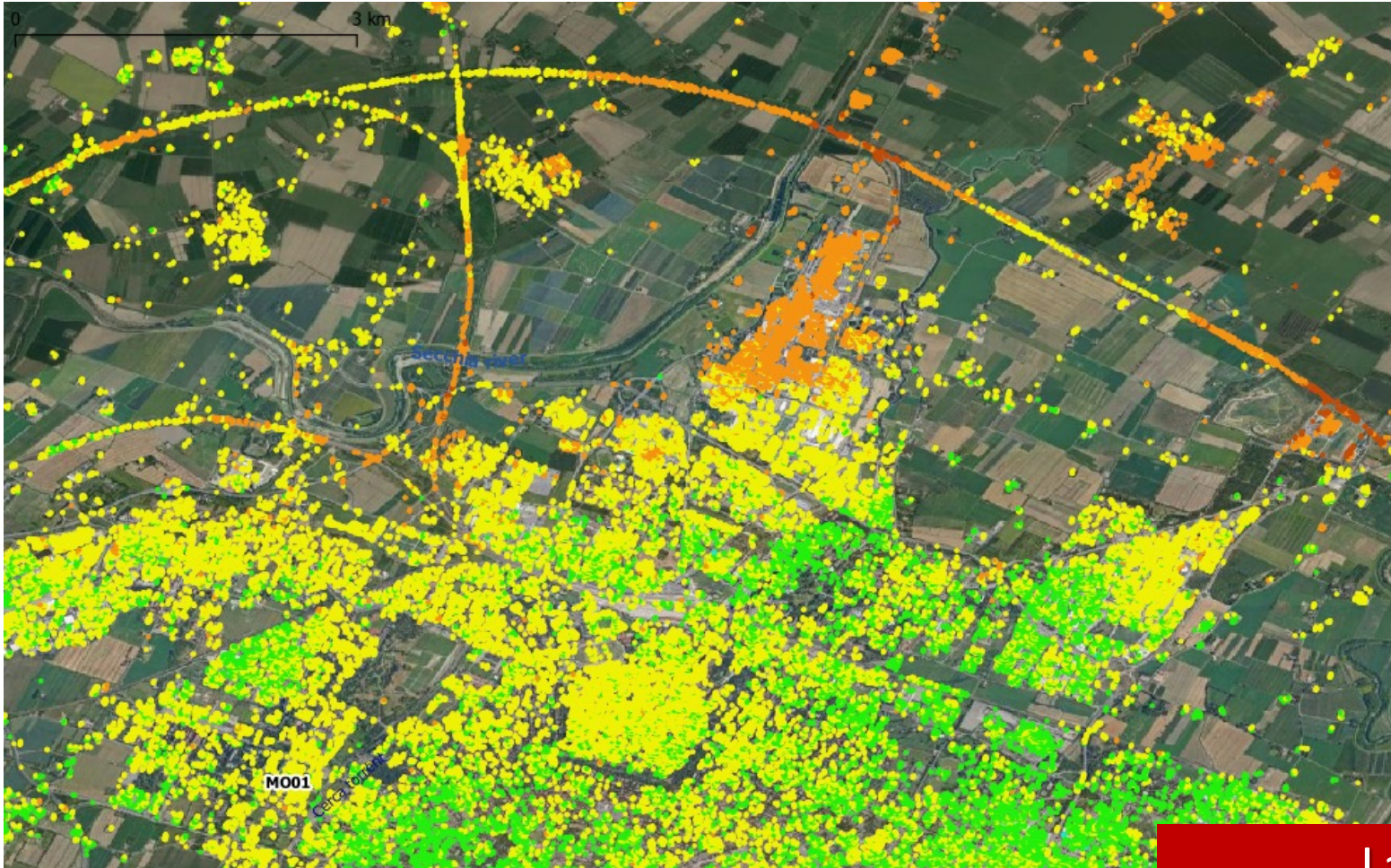
## Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati



Laboratorio di Geomatica

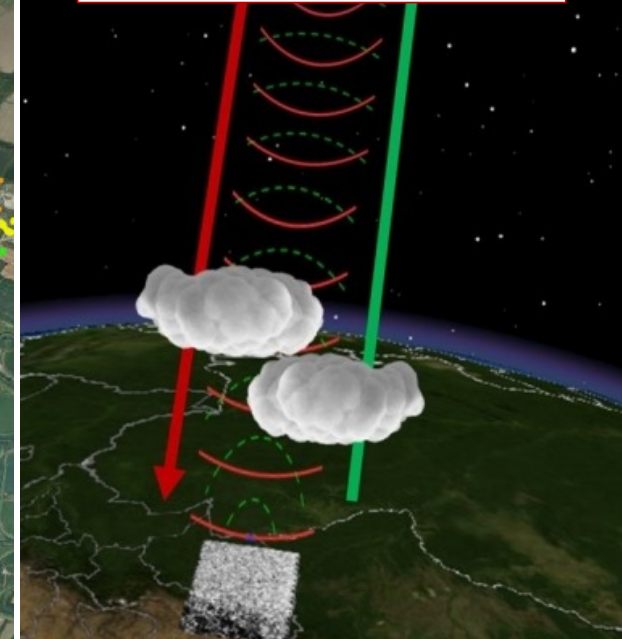
<http://www.geomatica.unimore.it/site/home.html>

## Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati



### Precisione:

È in grado di rilevare spostamenti millimetrici o sub-millimetrici.



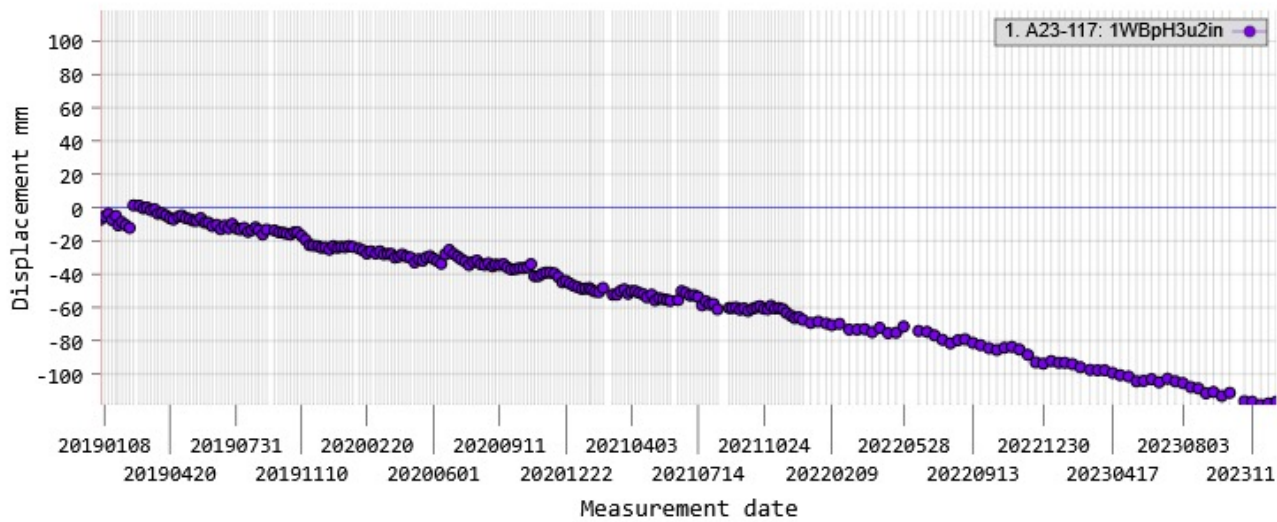
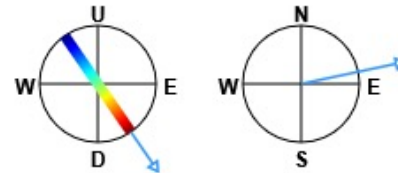
Laboratorio di Geomatica

<http://www.geomatica.unimore.it/site/home.html>

1. A23-117: 1WBpH3u2in

**Dataset:** A23-117  
**Point ID:** 1WBpH3u2in  
**Position:** 2410274.00 N 4388850.00 E -38.50 m  
**Mean velocity:** -23.20 mm/year  
**Coherence:** 0.81  
**RMSE:** 2.30 mm

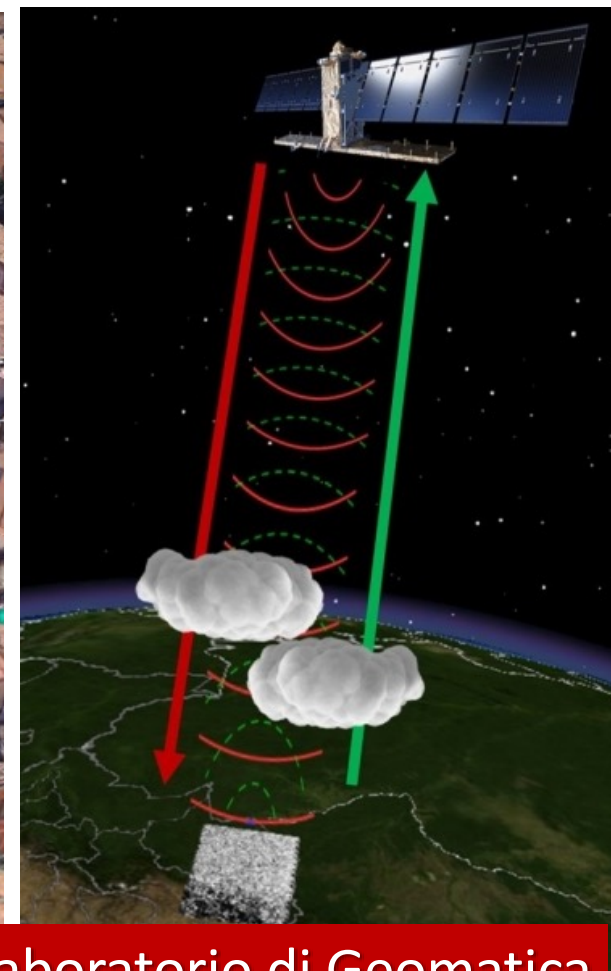
**Incidence angle:** 34.57°  
**Track angle:** -11.94°



Lines  Points  Dense grid



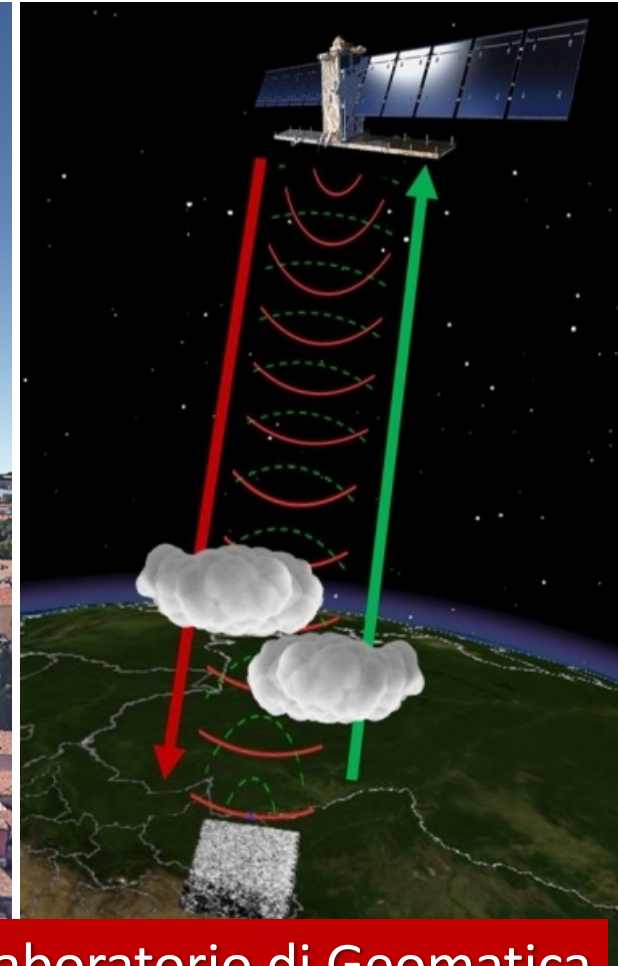
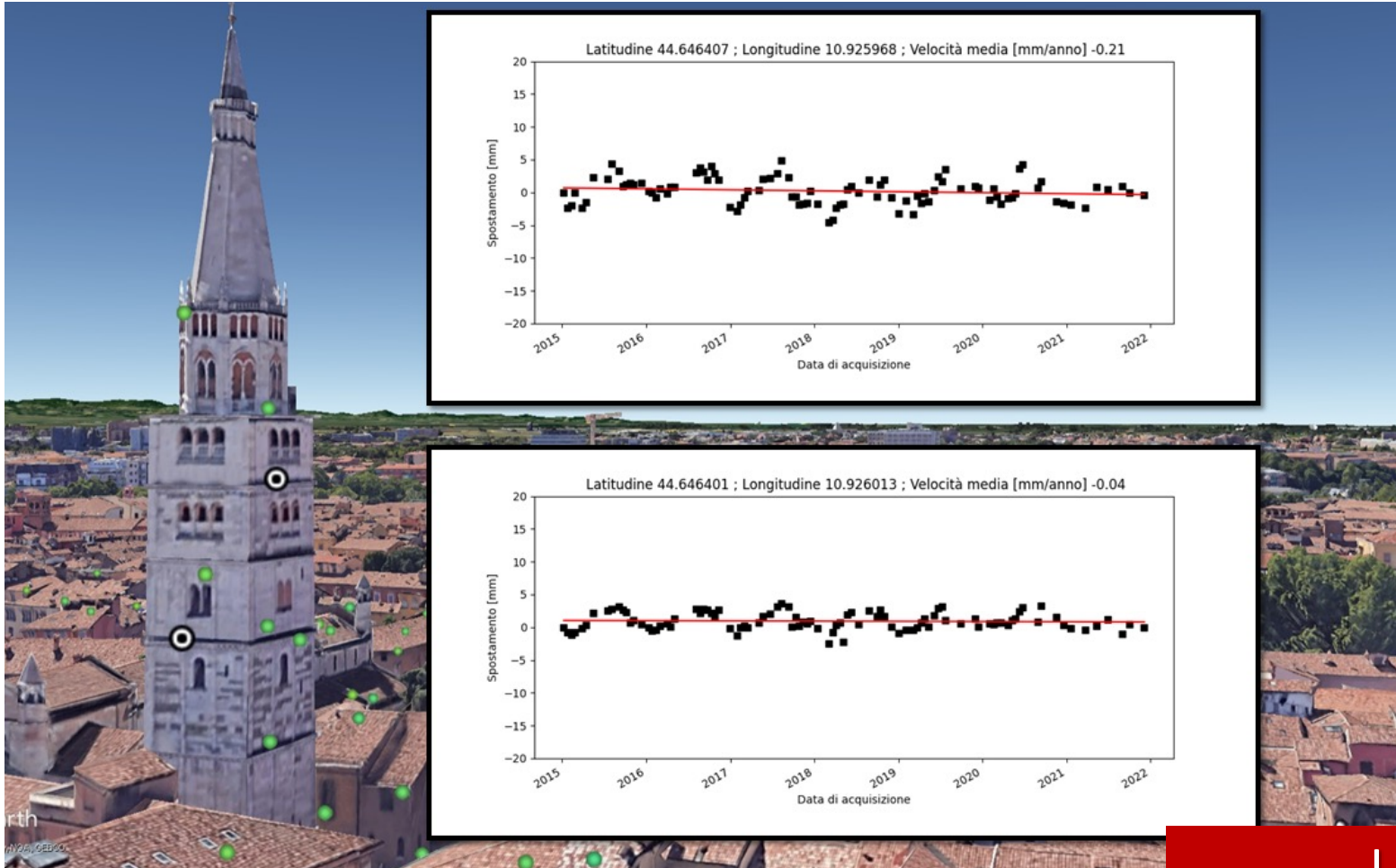
## Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati



Laboratorio di Geomatica

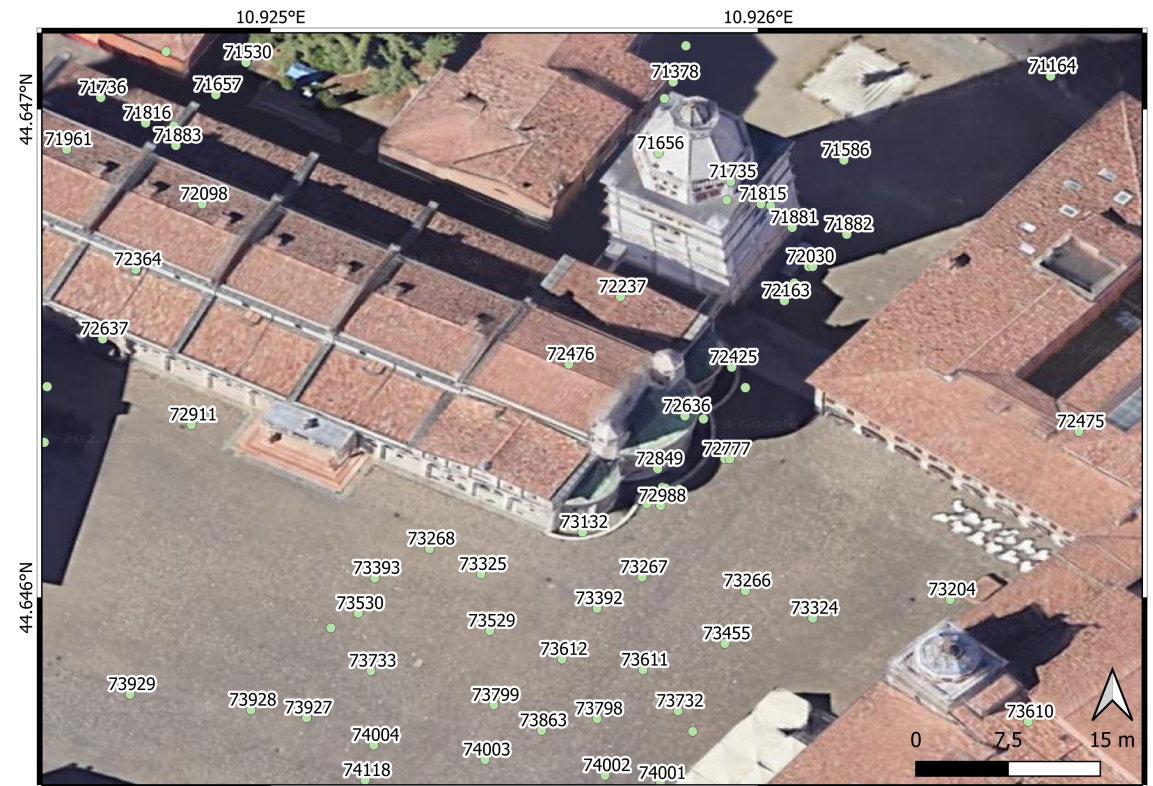
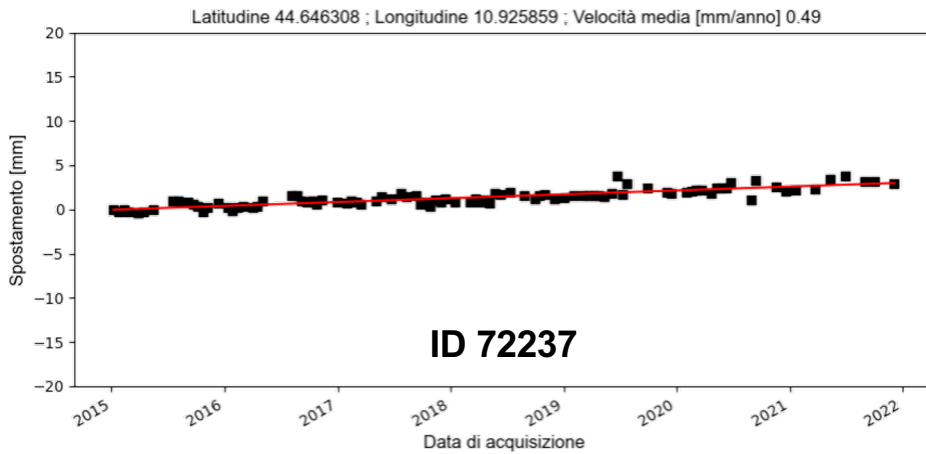
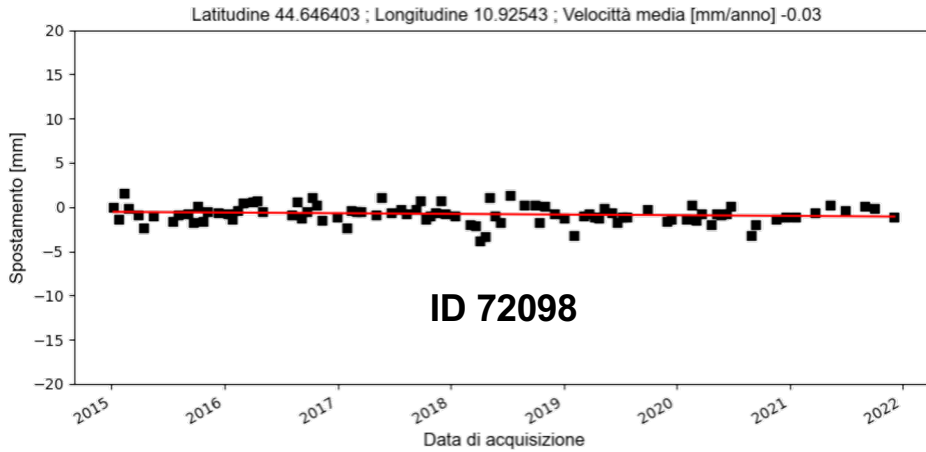
<http://www.geomatica.unimore.it/site/home.html>

# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati



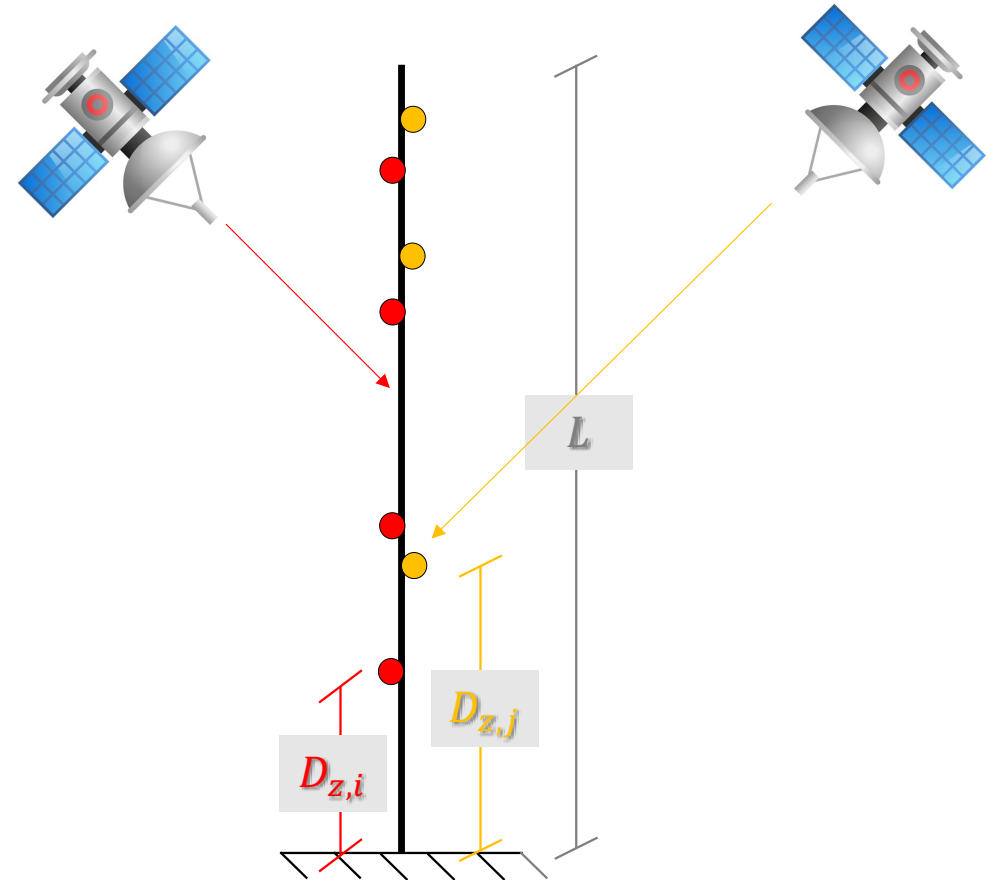
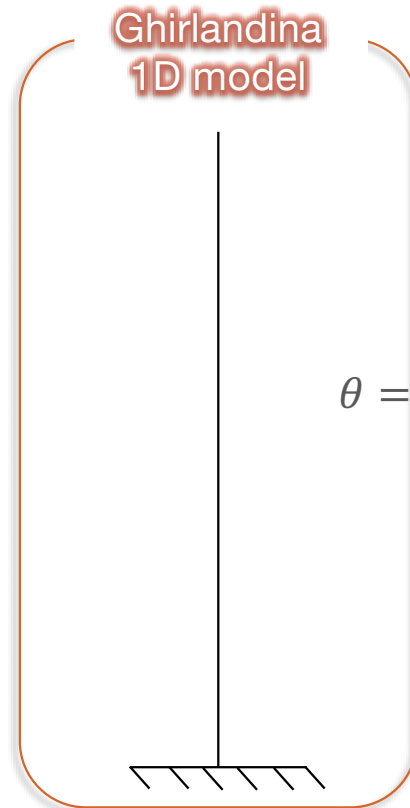
# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI



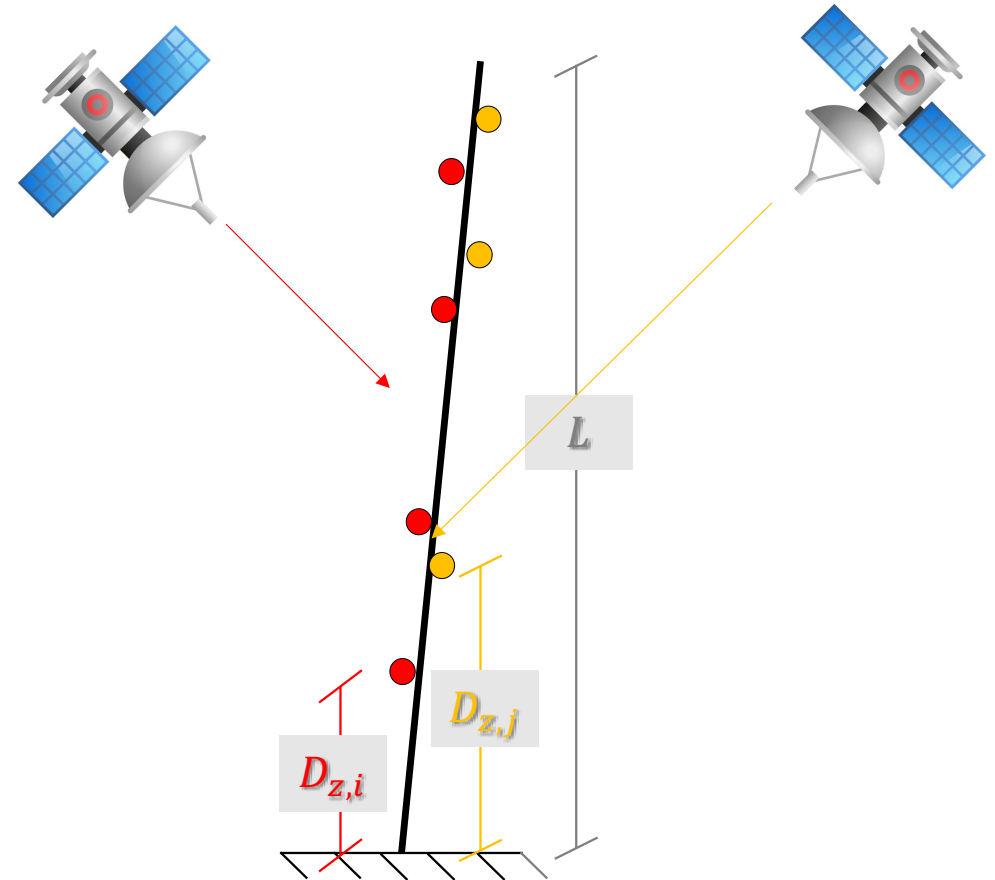
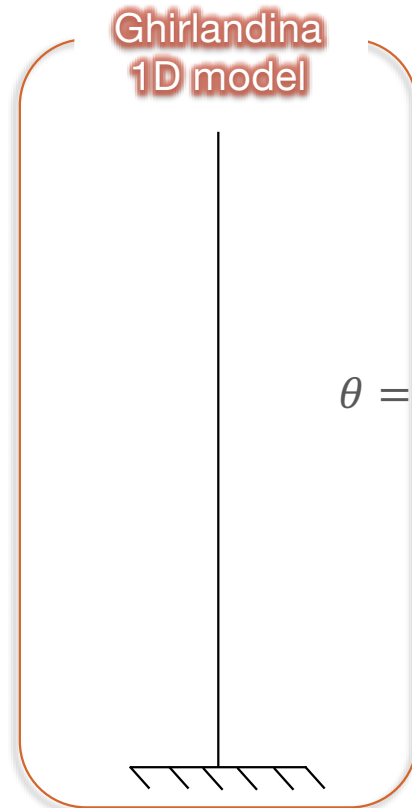
# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI



# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI



# Analisi, Interpretazione e Validazione dei dati

## Dati SATELLITARI

Sviluppo di un metodo basato sull'ipotesi di moto rigido e l'utilizzo di un dataset SAR in doppia orbita

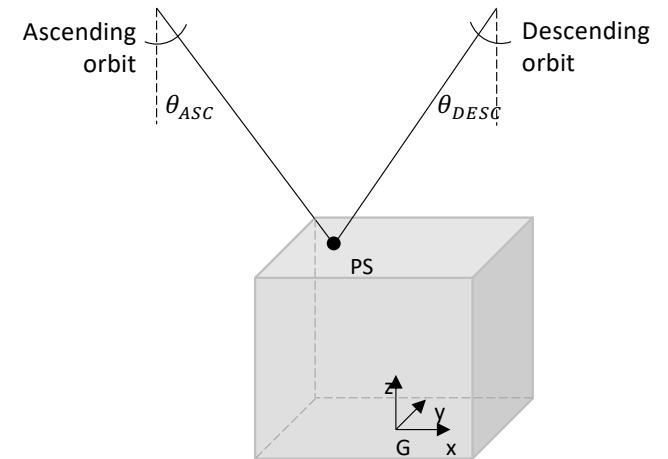
Componenti dello spostamento di un target rispetto alle component globali:

$$\begin{cases} v_{x,i} = v_{x,G} + \Phi_y \cdot D_{z,i} - \Phi_z \cdot D_{y,i} \\ v_{y,i} = v_{y,G} - \Phi_x \cdot D_{z,i} + \Phi_z \cdot D_{x,i} \\ v_{z,i} = v_{z,G} + \Phi_x \cdot D_{y,i} - \Phi_y \cdot D_{x,i} \end{cases}$$

+

Spostamenti da tecnica multi-temporale (orbita ascendente e discendente):

$$\begin{cases} d_{asc,i} = -v_{x,i} \cdot \cos \theta_{asc} + v_{z,i} \cdot \sin \theta_{asc} \\ d_{desc,i} = +v_{x,i} \cdot \cos \theta_{desc} + v_{z,i} \cdot \sin \theta_{desc} \end{cases}$$



$$\begin{bmatrix} d_{a,1} \\ \vdots \\ d_{a,n} \\ d_{d,1} \\ \vdots \\ d_{d,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha_a & \cos \alpha_a & D_{y,1} \cdot \cos \alpha_a & (-D_{z,1} \cdot \sin \alpha_a - D_{x,1} \cdot \cos \alpha_a) & D_{y,1} \cdot \sin \alpha_a \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\sin \alpha_a & \cos \alpha_a & D_{y,n} \cdot \cos \alpha_a & (-D_{z,n} \cdot \sin \alpha_a - D_{x,n} \cdot \cos \alpha_a) & D_{y,n} \cdot \sin \alpha_a \\ \sin \alpha_d & \cos \alpha_d & D_{y,1} \cdot \cos \alpha_d & (D_{z,1} \cdot \sin \alpha_d - D_{x,1} \cdot \cos \alpha_d) & -D_{y,1} \cdot \sin \alpha_d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin \alpha_d & \cos \alpha_d & D_{y,m} \cdot \cos \alpha_d & (D_{z,m} \cdot \sin \alpha_d - D_{x,m} \cdot \cos \alpha_d) & -D_{y,m} \cdot \sin \alpha_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x,G} \\ v_{z,G} \\ \Phi_x \\ \Phi_y \\ \Phi_z \end{bmatrix}$$

SAR dual orbit displacements (M)

Geometric parameters (S)

Rigid motion components ( $\Theta$ )

Soluzione ai minimi quadrati:

$$\hat{\Theta} = (S^T S)^{-1} S^T M = BM$$



**UNIMORE**  
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
MODENA E REGGIO EMILIA

DIEF - Dipartimento di Ingegneria Enzo Ferrari

**Grazie per l'attenzione**



LORIS VINCENZI

[loris.vincenzi@unimore.it](mailto:loris.vincenzi@unimore.it)



FRANCESCO  
MANCINI



CRISTINA  
CASTAGNETTI



FRANCESCA  
GRASSI



ELISA  
BASSOLI



FEDERICO  
PONSÌ



GHITA  
ESLAMI  
VARZANEH