



# SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

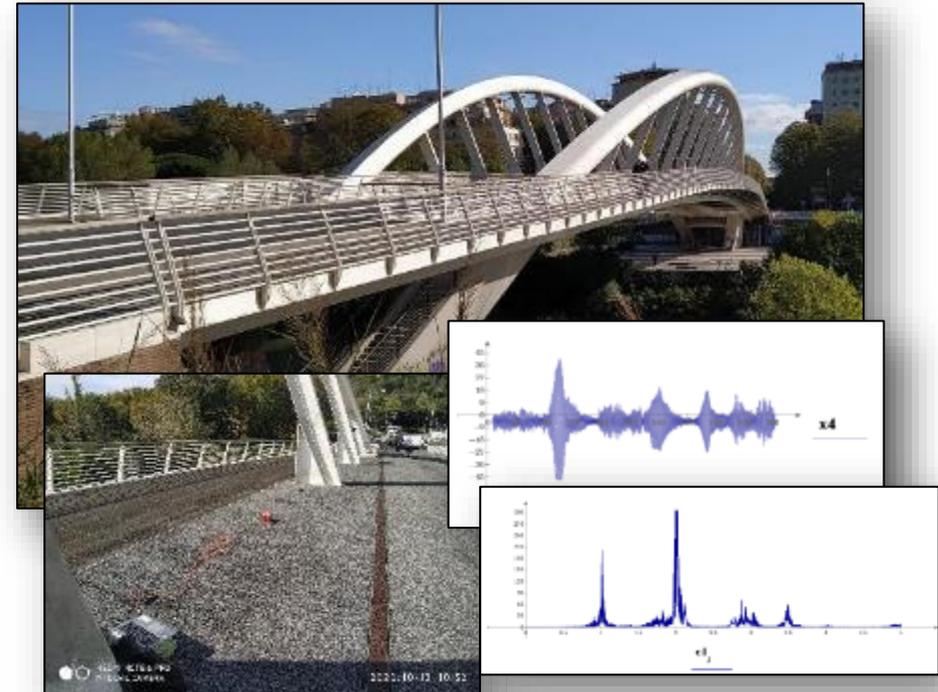
**Il monitoraggio vibrazionale on-site e l'utilizzo di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed opere infrastrutturali (Parte 2)**

# OBIETTIVI DEL MONITORAGGIO SATELLITARE

- messa a punto di metodologie per il **monitoraggio di strutture, infrastrutture di interesse strategico** in grado di integrare dati acquisiti direttamente sulle strutture monitorate mediante tecniche e metodologie diagnostiche non distruttive a bassa invasività con quelli acquisiti via satellite, e di sviluppare una piattaforma per l'interoperabilità con gli Enti gestori e la Protezione Civile.
- Identificare precocemente eventuali **stati di danno strutturale o malfunzionamenti** e in modo affidabile rispetto alle tradizionali operazioni di sorveglianza, per una corretta e più efficace **gestione** di eventuali **emergenze** e per la **manutenzione programmata**.

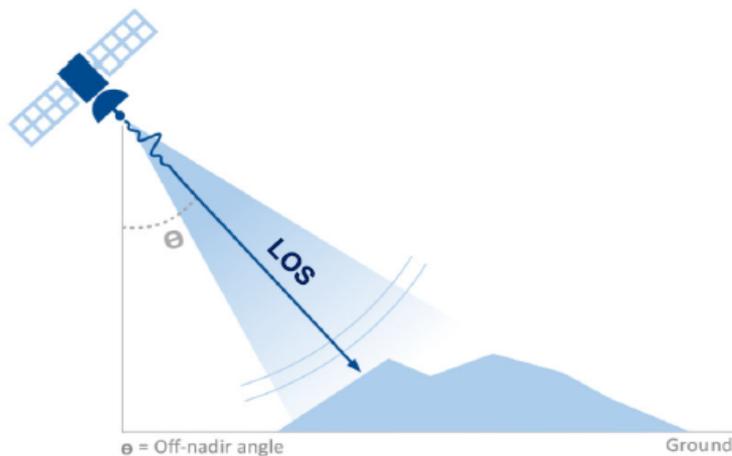


Cortesia Agenzia Spaziale Italiana



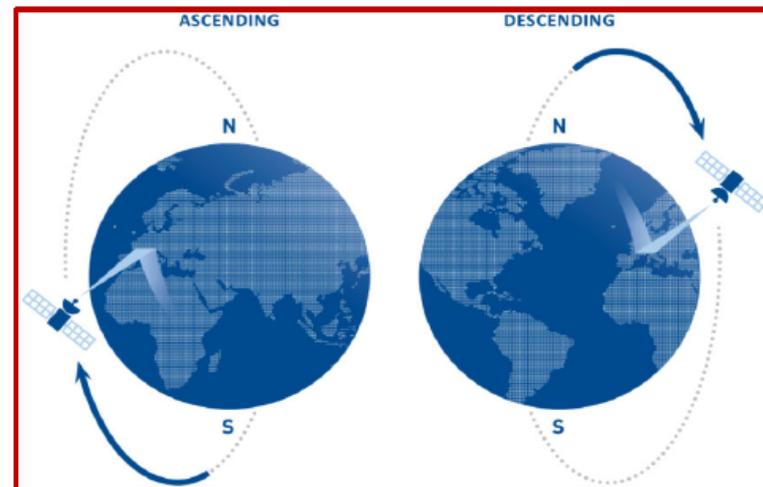


## La tecnologia radar satellitare



Il satellite emette il segnale lungo una direzione denominata «**linea di vista**» o **LOS** (*Line of sight*), caratterizzata da una certa **inclinazione  $\theta$**  rispetto alla **verticale**.

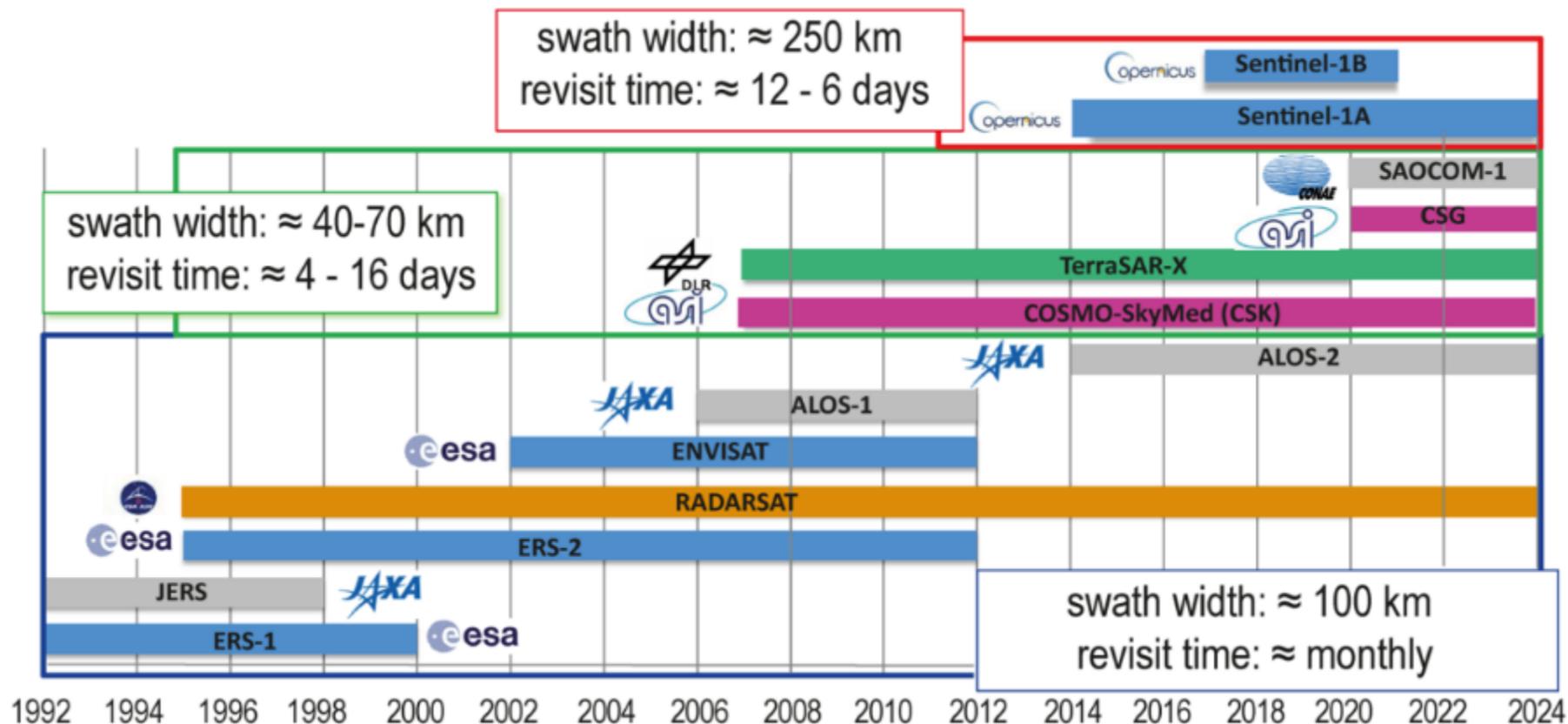
In particolare, il satellite può osservare il medesimo bersaglio a terra percorrendo un'**orbita ascendente** oppure un'**orbita discendente**.



I satelliti **SAR** (*Synthetic Aperture Radar*) sono equipaggiati con emettitori ed antenne che permettono di **acquisire immagini radar della superficie terrestre**.

Il principio di funzionamento è analogo a quello del radar terrestre. Un segnale viene emesso dal satellite verso la superficie della terra ed **una parte di esso viene riflessa e acquisita** dall'antenna montata sul satellite.

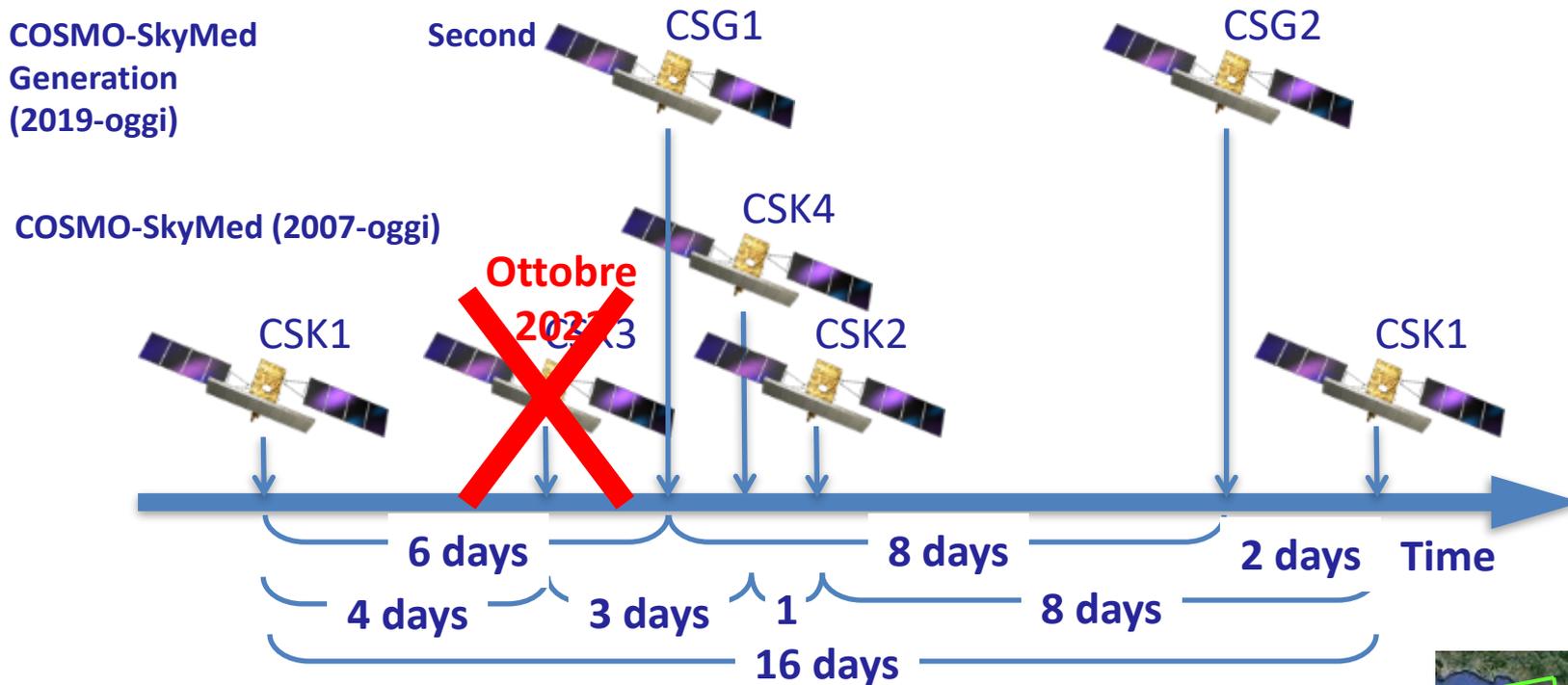
La **fase del segnale** rilevato dipende dalla **distanza tra il satellite ed il bersaglio a terra**, oltre che da una serie di disturbi legati alle condizioni atmosferiche e al rumore.



Principali sensori SAR satellitari che hanno operato a partire dal 1991 e/o continuano ad essere operativi.

Su gentile concessione di  
Riccardo Lanari e  
Manuela Bonano

## COSMO-SkyMed di Prima e Seconda Generazione (CSK/CSG)

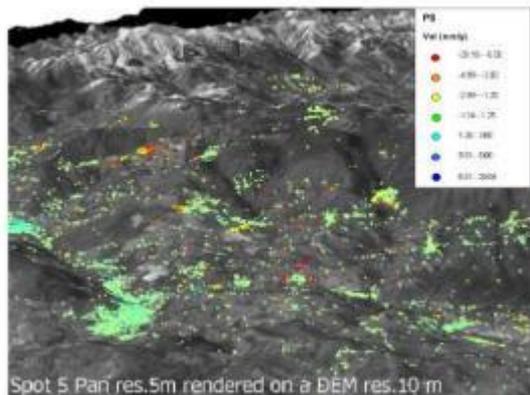


- Risoluzione spaziale (StripMap): 3 m x 3 m
- Copertura (StripMap): 40 km x 40 km
- Banda X ( $\lambda \sim 3.1$  cm)
- Missione duale (civile - militare)



Su gentile concessione dell'Agencia Spaziale Italiana (ASI) per l'utilizzo dei dati Cosmo SkyMed e del CNR Irea (Riccardo Lanari e Manuela Bonano)

## ➤ Frane a cinematica lenta

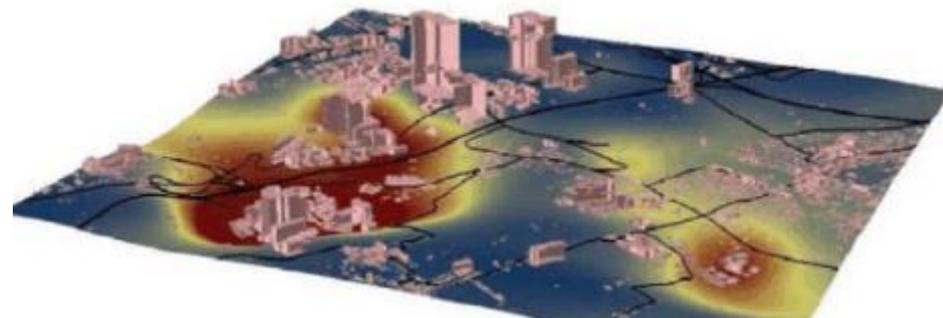


Progetto SLAM (Service for Landslide Monitoring) Finanziato dall'ESA (2005)

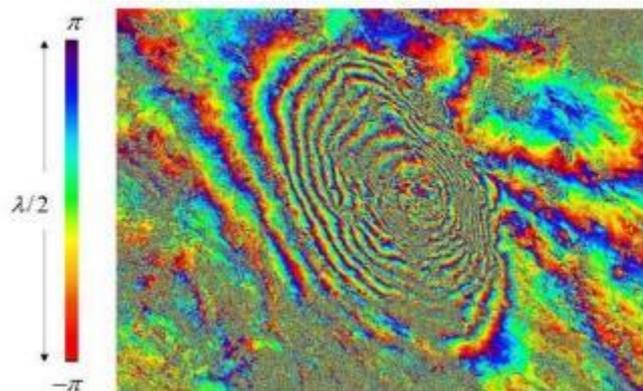
## ➤ Subsidenza



## ➤ Sinkholes



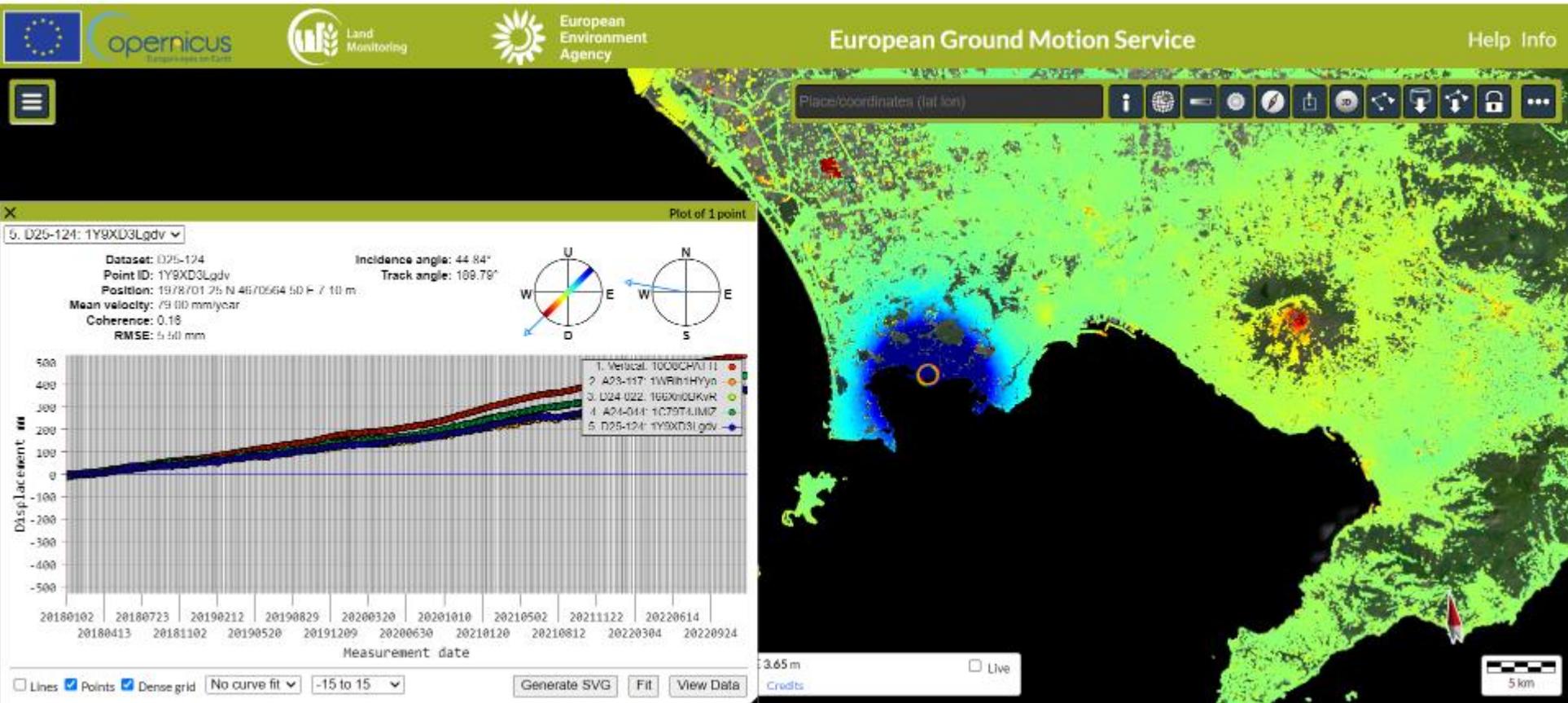
## ➤ Effetti del Sisma



Interferogramma co-sismico relativo al terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009, ottenuto con immagini SAR COSMO-Sky-Med, acquisite il 4 e il 12 aprile 2009 lungo orbite ascendenti

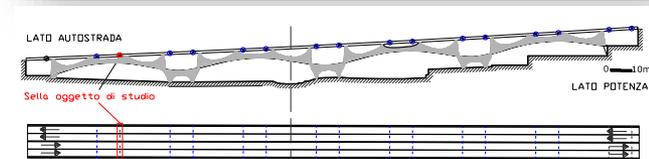
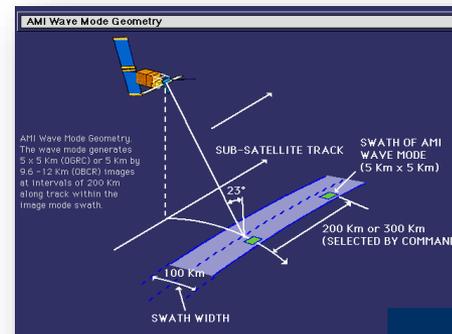
Fonte immagini: Linee Guida per l'analisi di dati interferometrici satellitari in aree soggette a dissesti idrogeologici, MATMTM, 2009 – PS-InSAR Manuale d'uso, Telerilevamento Europa, 2008

# DATI SATELLITARI: Ambiti di applicazione consolidati

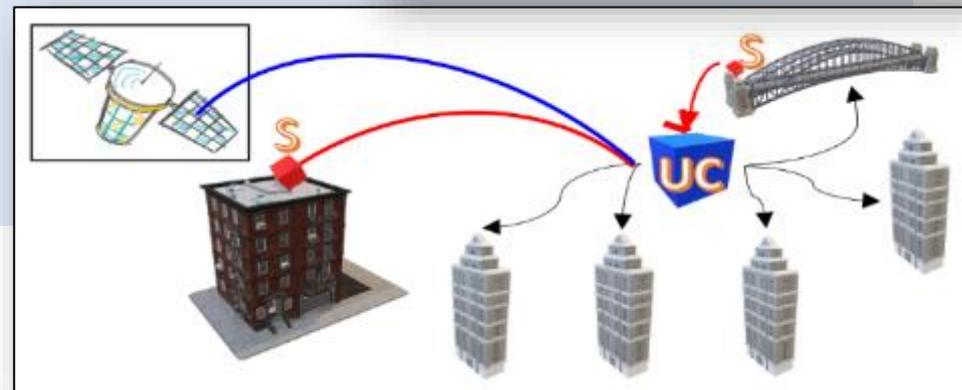
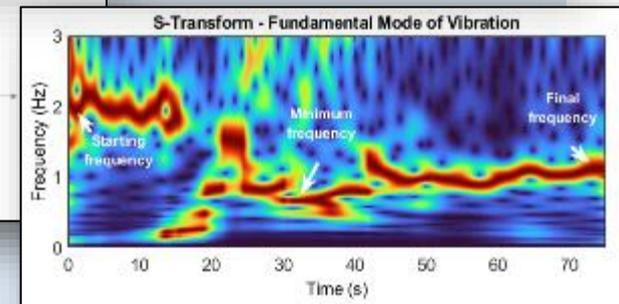
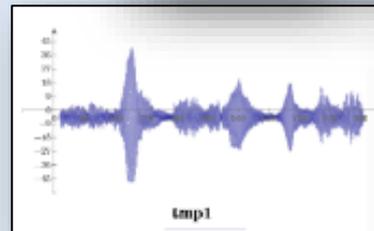
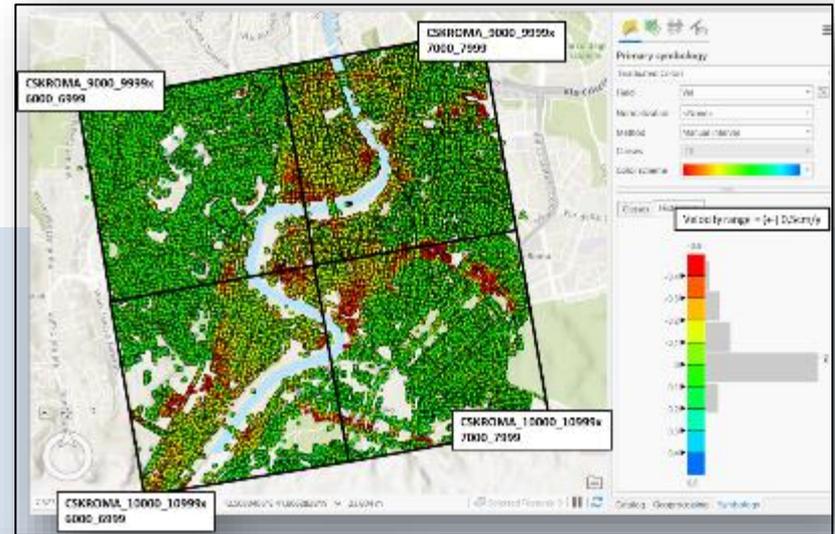


## La sfida – passaggio da analisi territoriali a studi su singole costruzioni

- Le misure interferometriche satellitari possono essere davvero utili a valutare il comportamento strutturale nel tempo?
- Quali tipi di movimenti possono essere rilevati?
- Quali tipi di costruzioni possono essere monitorate?
- Quali fenomeni di danno sulle costruzioni possono essere seguiti?
- Quali caratteristiche debbono avere tali misure, e dunque quali sensori, quali tecnologie interferometriche sono più efficaci e utili alla diagnosi strutturale?
- Quali comportamenti strutturali si possono effettivamente individuare con l'interferometria satellitare e monitorare nel tempo per poter effettuare una diagnosi utile (comportamento Fisiologico – Comportamento patologico)?
- L'interferometria satellitare, adeguatamente interpretata, è da sola in grado di consentire una diagnosi corretta?
- Quali azioni complementari o successive di monitoraggio, modellazione e indagini in sito sono necessarie per arrivare a una diagnosi strutturale corretta?



- Monitoraggio di strutture e infrastrutture durante le **normali condizioni di esercizio**.
- Monitoraggio, in real-time e quasi real-time, di strutture e infrastrutture a **valle di eventi calamitosi**.
- Integrazione dei dati provenienti dai sistemi di monitoraggio on site e satellitari in **sistemi di Early-Warning** per l'allertamento e la gestione delle emergenze (terremoti, Frane, Alluvioni ecc...).



**WP 6.1:** Edifici ordinari e di importanza strategica in c.a.

**WP 6.2:** Edifici ordinari e di importanza strategica in muratura

**WP 6.3:** Infrastrutture rilevanti (ponti, viadotti)

**WP 6.4 :** Edifici di interesse storico-monumentale ed aree archeologiche

**Edifici Standard, industriali e strategici**



**Ponti**



**Edifici Monumentali**

**Impianti Strategici**



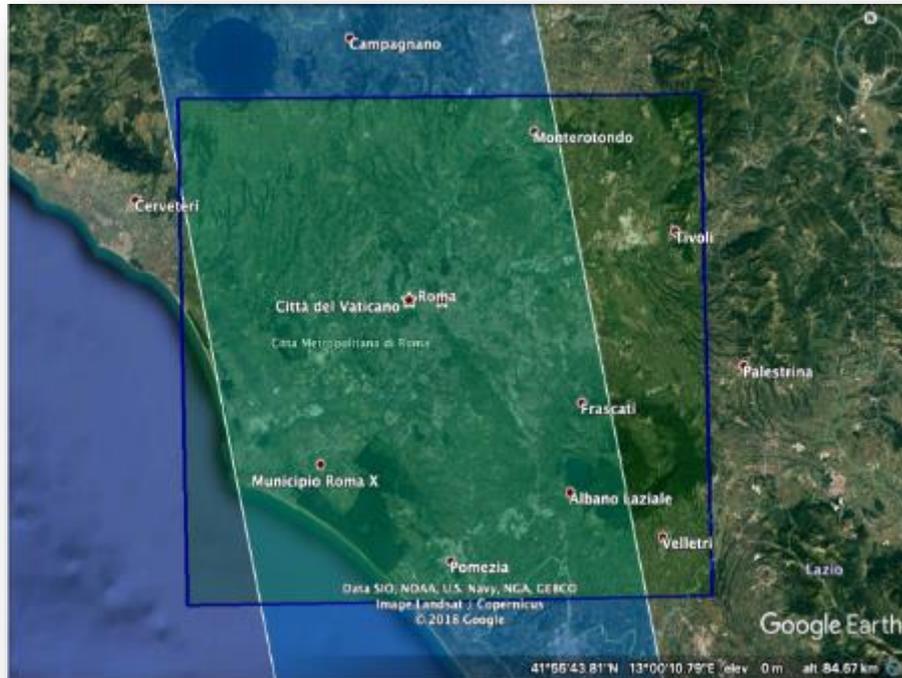
**Viadotti**



**Edifici Monumentali**

Sono stati considerati casi per i quali sono disponibili sia dati satellitari sia dati acquisiti con sistemi di monitoraggio on-site. Definire i criteri per il trattamento e l'utilizzo dei dati satellitari ed effettuare comparazioni con le informazioni ricavate da Dati GPS, Dati vibrazionali, Ispezioni visive, Modelli numerici, Informazioni sulle strutture, Informazioni Geologiche e Geotecniche.

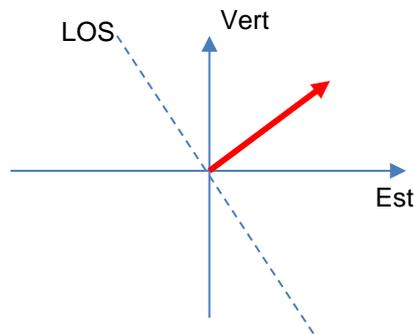
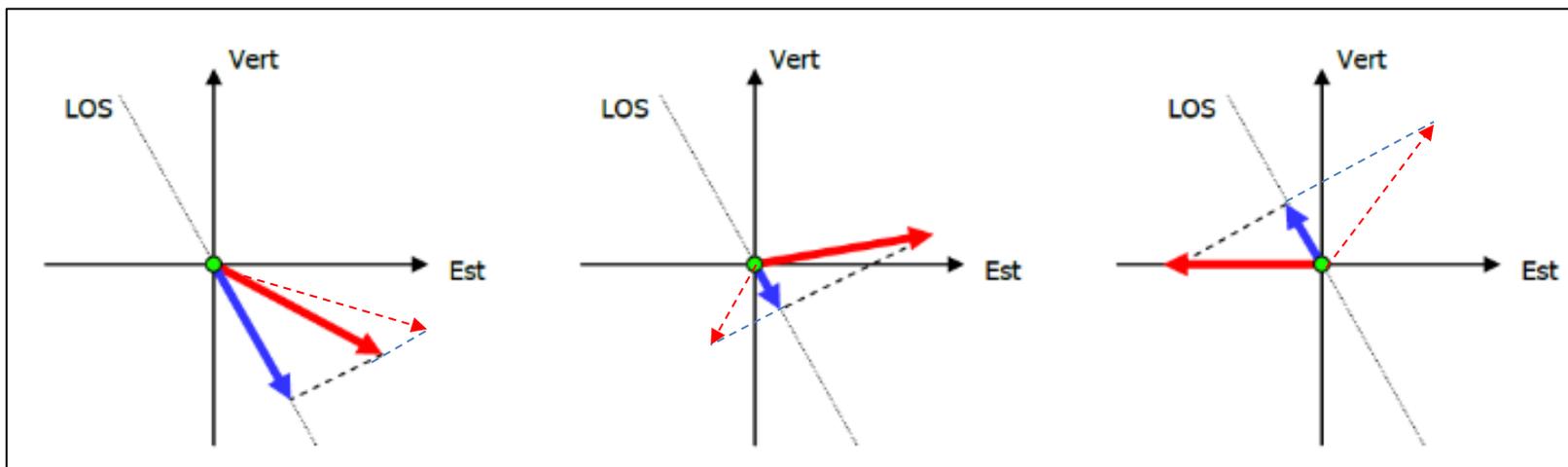
## AREA DI STUDIO



Dati ASI - Dataset Roma: orbita ascendente e discendente

## INTERPRETAZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI DA SATELLITE

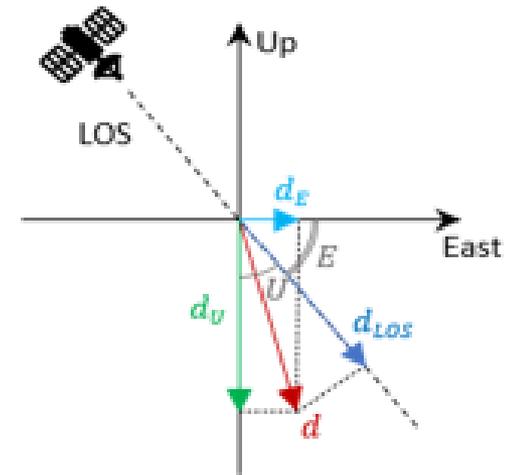
Conoscere lo spostamento, o la velocità di deformazione, lungo la LOS in una sola geometria non è sufficiente per identificare univocamente lo spostamento reale del punto poiché più spostamenti reali possono dare lo stesso spostamento lungo la LOS.



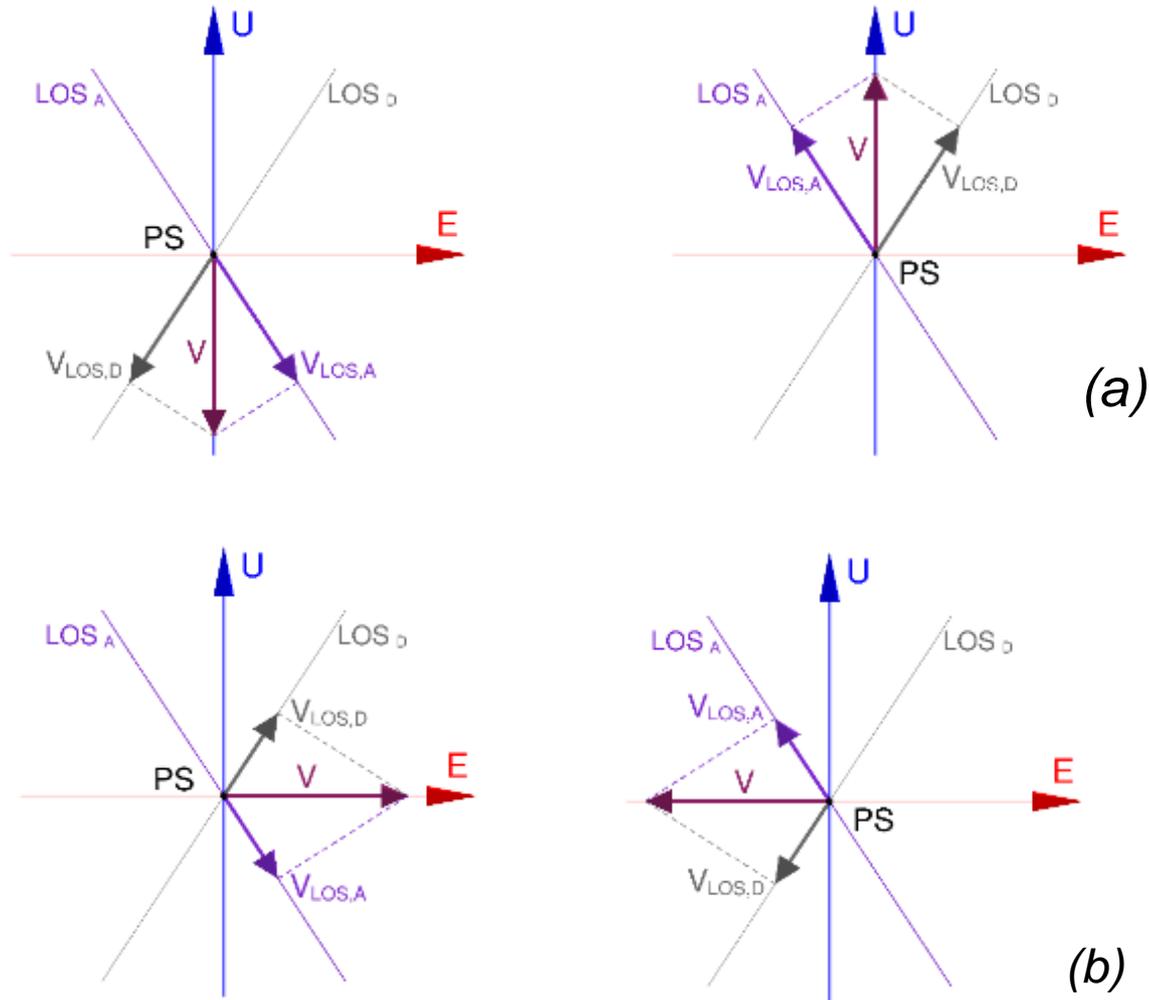
## INTERPRETAZIONE ED ELABORAZIONE DEI DATI DA SATELLITE

Per conoscere lo spostamento reale è necessario che per lo stesso punto si disponga dei dati sia per la geometria ascendente che discendente. Il vettore spostamento nelle due geometrie può essere espresso in generale come:

$$\begin{cases} S_{LOS,ASC} = S_{E-W}(\cos E)_{ASC} + S_{N-S}(\cos N)_{ASC} + S_{VERT}(\cos U)_{ASC} \\ S_{LOS,DISC} = S_{E-W}(\cos E)_{DISC} + S_{N-S}(\cos N)_{DISC} + S_{VERT}(\cos U)_{DISC} \end{cases}$$

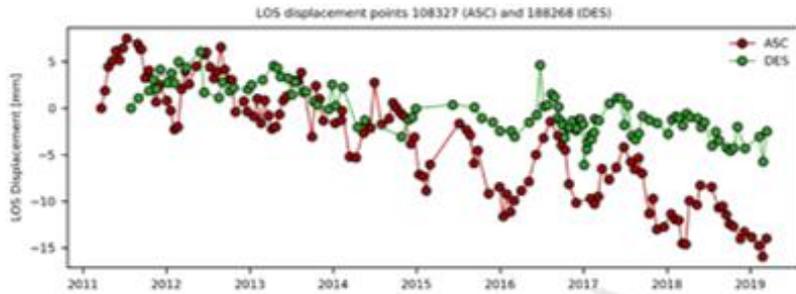


Il numero di incognite ( $S_{E-W}$ ,  $S_{N-S}$  e  $S_{VERT}$ ) è superiore a quello delle equazioni e quindi esso non è risolvibile. Tuttavia, siccome per la geometria di acquisizione del satellite la componente del moto lungo la direzione S-N / N-S non è rilevabile, si assume ( $S_{N-S} = 0$ ) e si risolve il precedente sistema in modo da risalire all'entità delle componenti del moto in direzione E-O ( $S_{E-O}$ ) e in direzione verticale ( $S_{VERT}$ ).



*Esempio di scomposizione del vettore di velocità media di spostamento reale in geometria ascendente e discendente. a) velocità verticale; b) velocità orizzontale.*

## Ricampionamento temporale



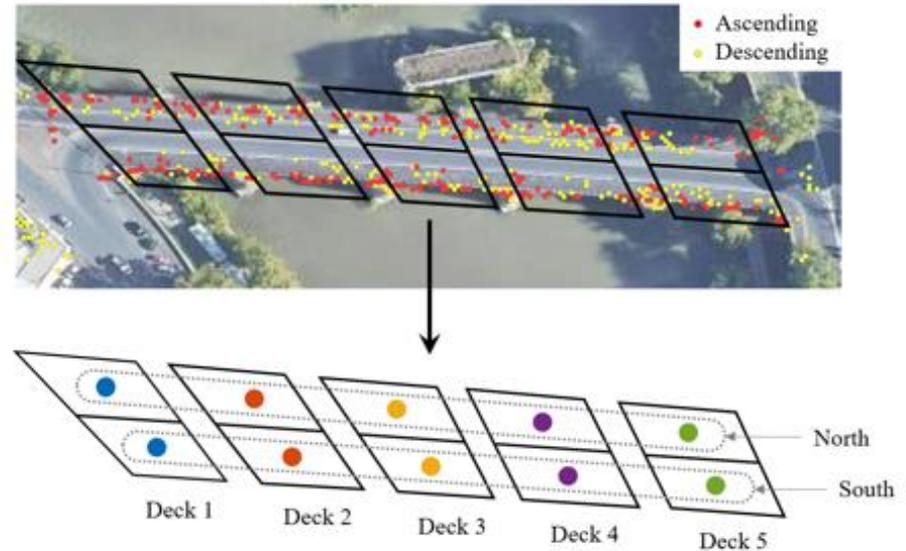
Pixel orbita ascendente



Pixel orbita discendente



## Ricampionamento spaziale



## PONTE PALATINO:



Politenico di Milano

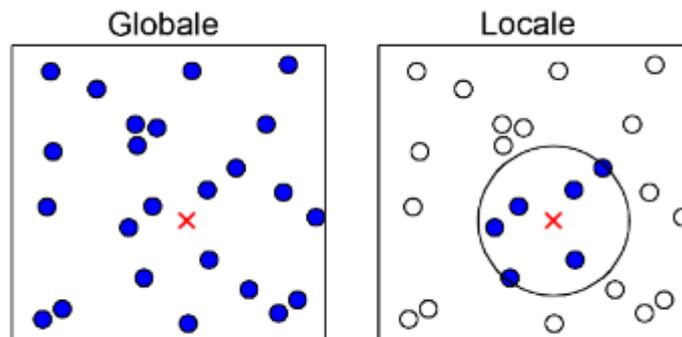
Le tecniche di ricampionamento spaziale possono essere impiegate per ottenere un insieme di punti referenziati spazialmente, cui sono associate le informazioni sugli spostamenti lungo la LOS per entrambe le geometrie di acquisizione

## *Interpolazione Spaziale*

- Un'interpolazione spaziale di dati SAR che ricadono in una certa area ha come obiettivo **l'assegnazione di un valore anche a punti non campionati**.
- Mediamente i **punti vicini hanno valori simili tra loro**, al di là di qualche possibile eccezione che possa causare una discontinuità di valori, e una buona interpolazione deve poter cogliere tali corrispondenze.
- Selezionare le **zone di interpolazione in funzione degli schemi statici** delle costruzioni considerate nonché dei loro potenziali cinematismi.
- L'utilizzo delle **tecniche di interpolazione deve essere limitato all'interno dell'involuppo convesso** (convex hull) dei punti.
- Esistono due principali categorie di metodi di interpolazione:

**Deterministici:** il legame fra punti vicini è espresso da una legge esplicita i cui parametri hanno significato fisico.

**Geostatistici:** il legame fra punti vicini è espresso da un legame statistico, che non necessariamente ha un significato fisico (Tecniche Kriging).

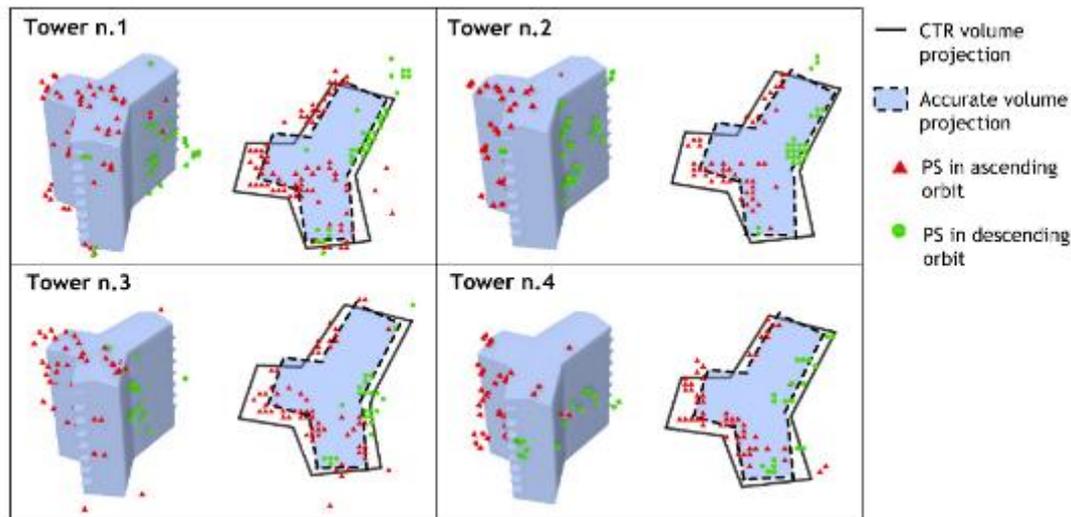


× Punto in cui si vuole prevedere il valore

## Interpolazione Spaziale

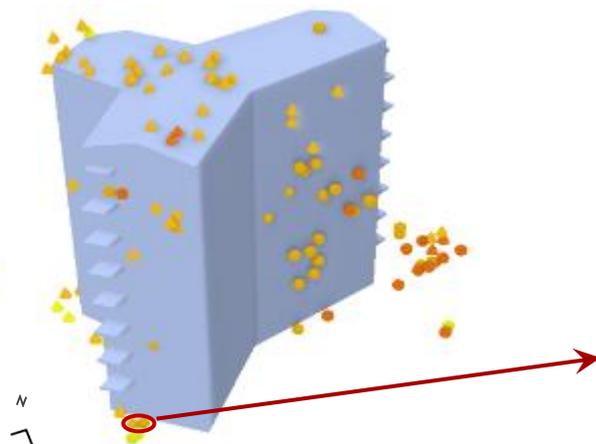
Caso Studio: Torri Stellari (1949-1952, Roma) – edifici in c.a. a telaio

### STIMA DEGLI SPOSTAMENTI CUMULATI



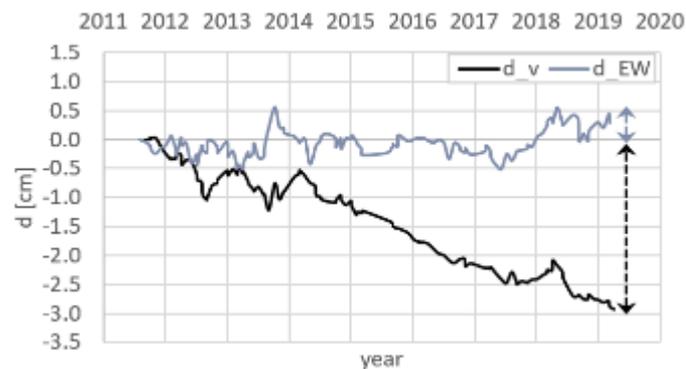
Utilizzo dei dati DINSAR ai fini dello SHM a scala di singola costruzione

Selezione Coppie di punti (Orbite Asc. E Disc.)



### APPROCCIO 1

Combinazione delle componenti di spostamento lungo la LOS in ogni istante di acquisizione



## Interpolazione Spaziale

Caso Studio: Torri Stellari (1949-1952, Roma) – edifici in c.a. a telaio

### STIMA DEGLI SPOSTAMENTI CUMULATI

#### APPROCCIO 2

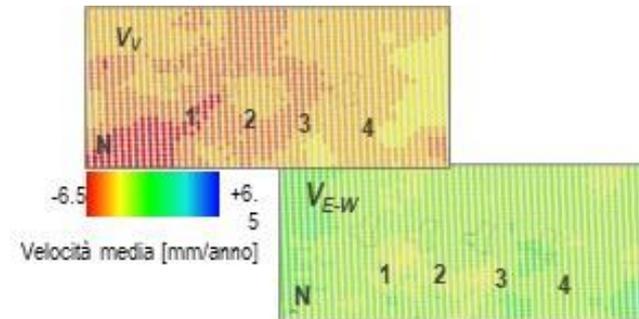
Combinazione delle componenti di velocità lungo la LOS di punti vicini su tutto il periodo di acquisizione

$$V_V = -0.381 \text{ cm/anno}$$

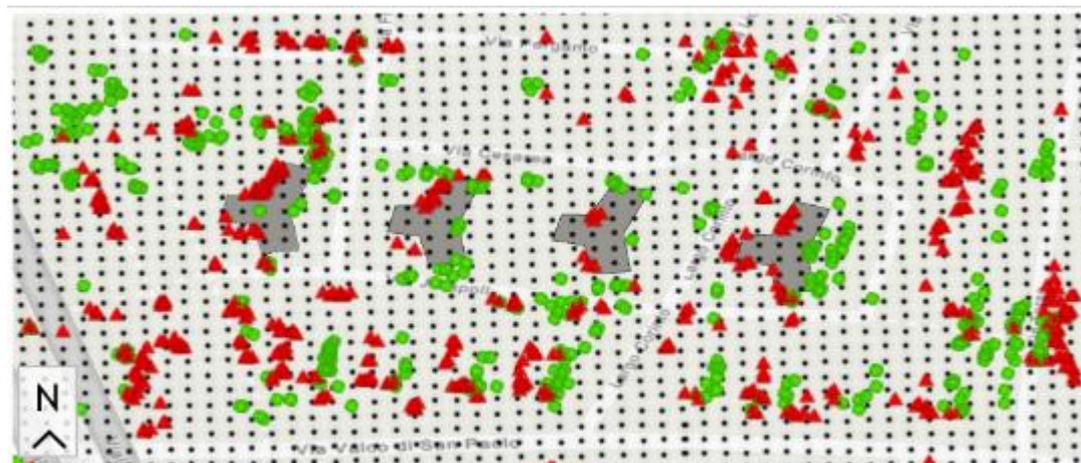
$$V_{EW} = +0.017 \text{ cm/anno}$$

#### APPROCCIO 3

Mappe di velocità media continue ottenute da interpolazione spaziale



Griglia adottata per l'area delle Torri Stellari, con sovrapposti i punti di misura ascendenti (rosso) e discendenti (verde).

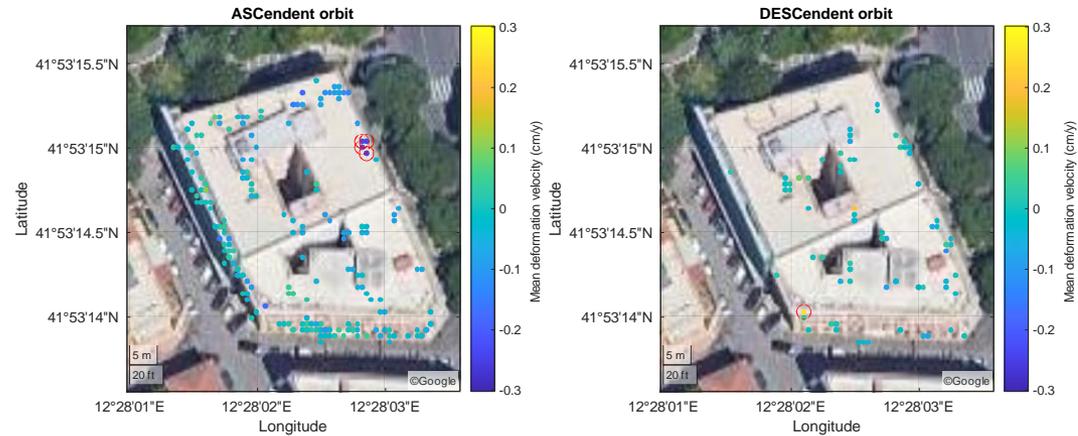


▲ PS in ascending orbit

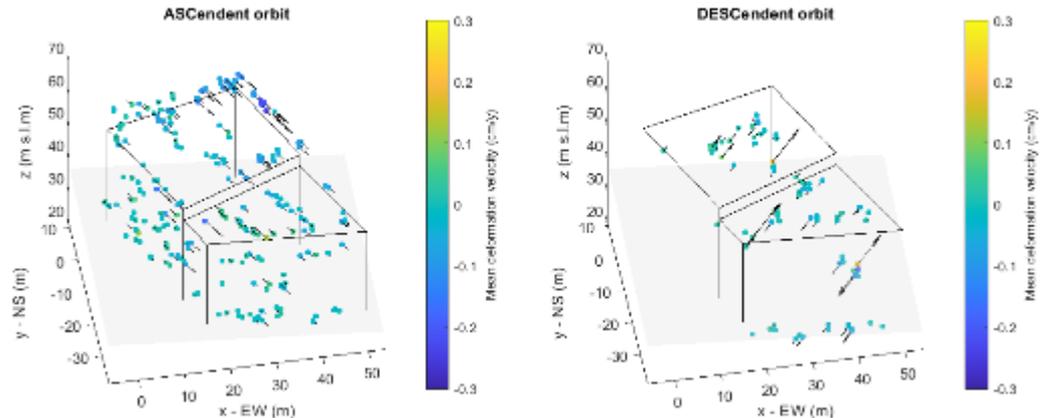
● PS in descending orbit

## Interpolazione Spaziale

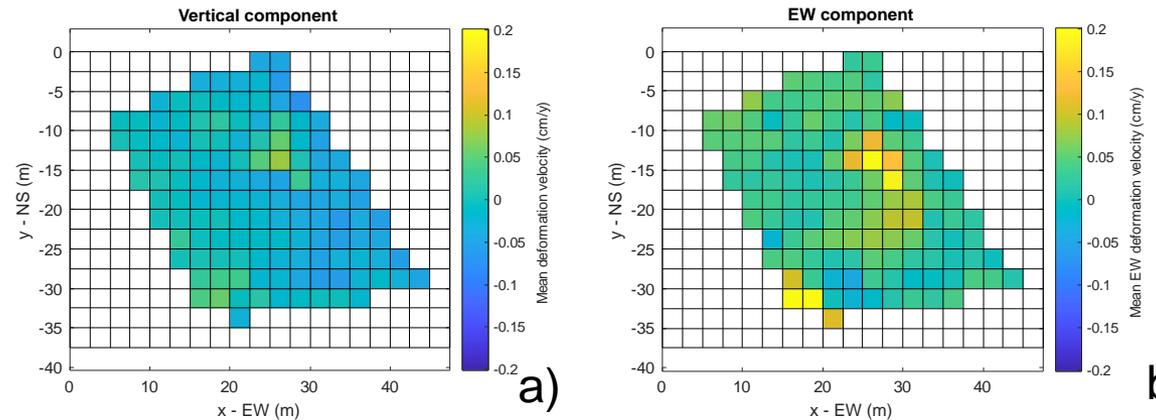
Mappa delle velocità medie di deformazione dell'edificio



Campo vettoriale delle velocità medie LOS



Componenti (a) verticale ed (b) orizzontale EW delle velocità medie di deformazione in copertura all'edificio, ottenute dall'interpolazione spaziale delle due orbite.

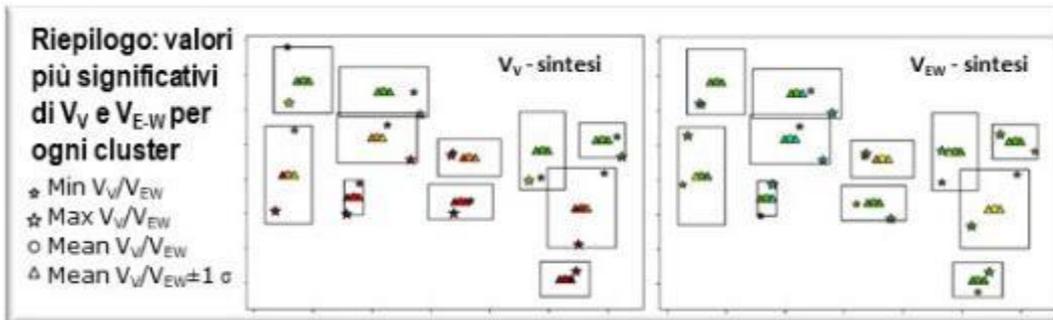
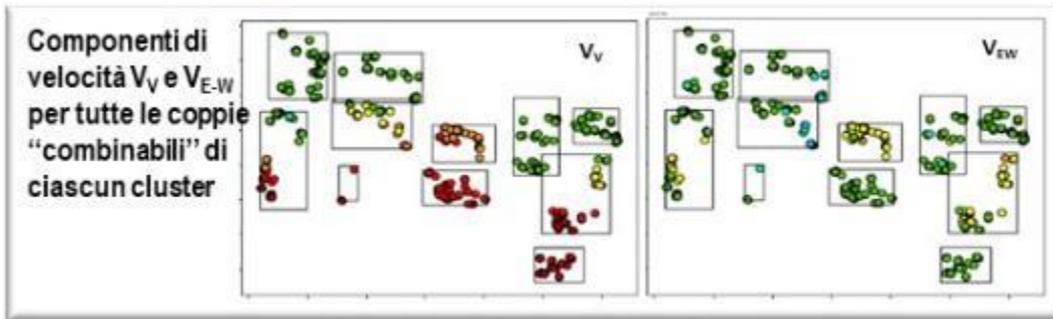
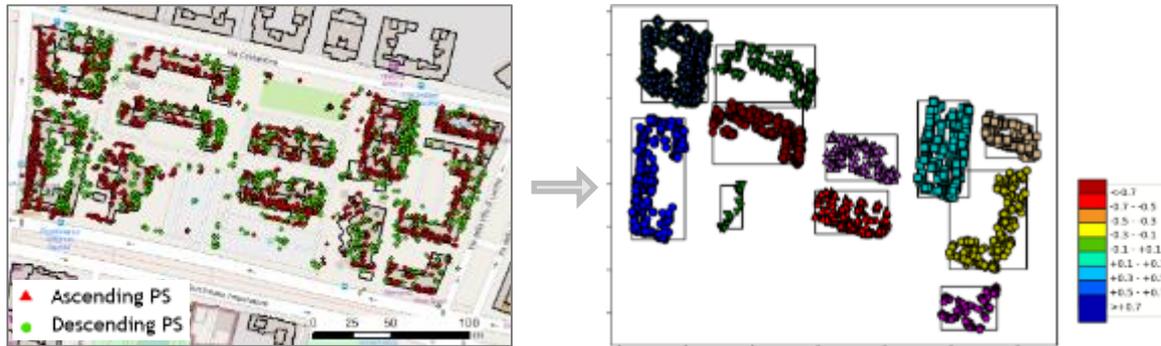


a)

b)

## IDENTIFICAZIONE PRELIMINARE DELLE STRUTTURE CRITICHE SULLA BASE DI ALGORITMI DI INTELLIGENZA ARTIFICIALE

(UNINA, UNITV e IUAV)

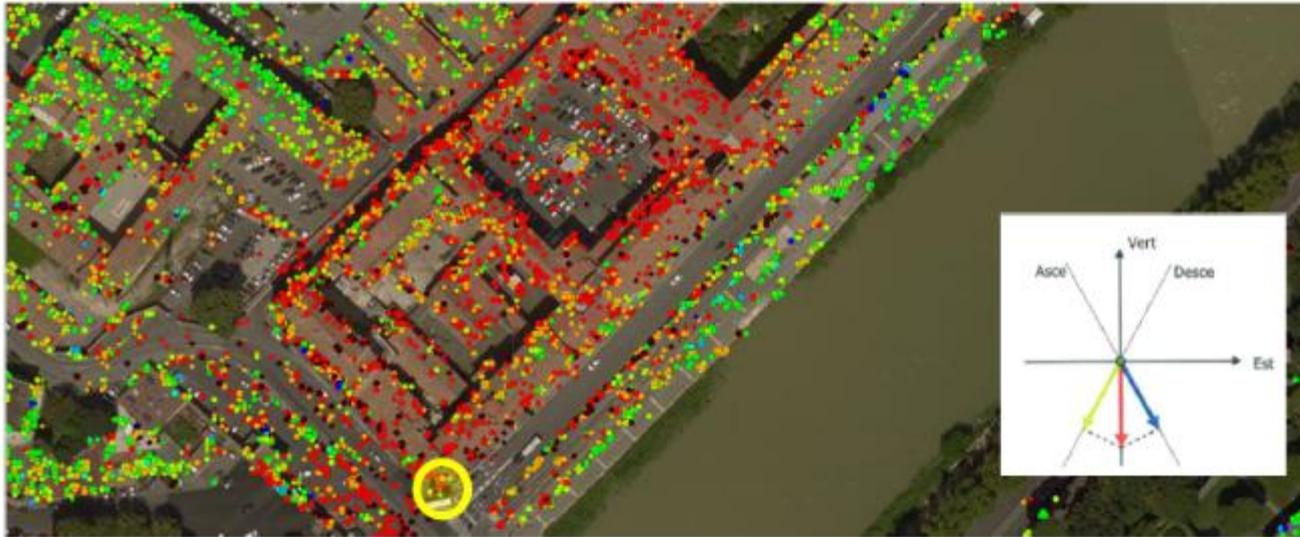


### FINALITA':

Implementare un algoritmo che, a partire dai PSs distribuiti su un'area, consenta di:

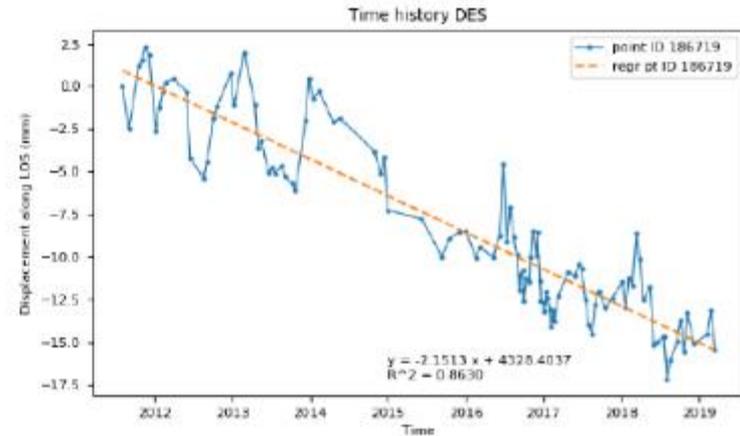
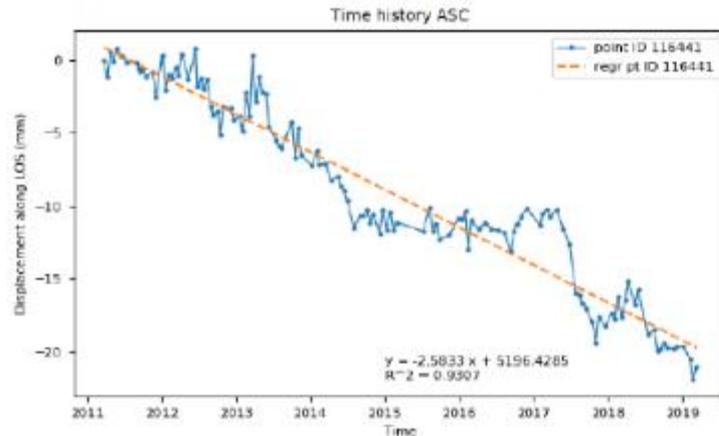
- Individuare la posizione degli edifici a partire solo dai dati SAR (**clusterizzazione**);
- Per ogni edificio, cioè per ogni cluster, fornire delle prime informazioni su quanto e come si sta deformando;
- Automatizzare il processo di creazione di mappe di deformazione a scala territoriale.

## Serie temporali di spostamento lungo la LOS:



Dai due dataset si ricava una velocità media annua molto simile (-2.2 mm/anno e -2.6 mm/anno rispettivamente per DES e ASC),  
Questo è indice che il movimento reale ha direzione prevalentemente verticale e rivolta verso il basso.

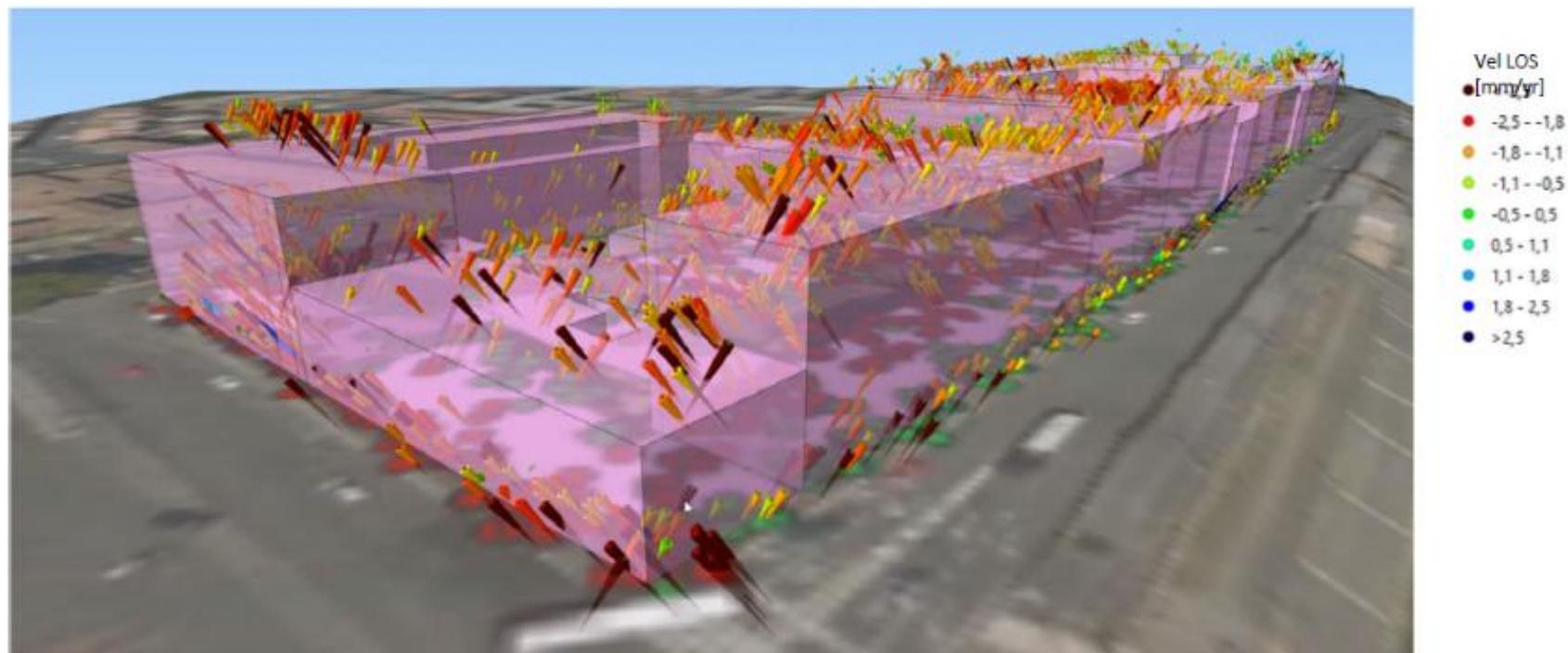
Plot delle storie di spostamento lungo la LoS di due punti molto vicini nella zona cerchiata di giallo (uno del dataset ASC e uno del dataset DES)



Fonte immagini: Progetto RELUIS 2019-2021 WP6 UR IUAV, Responsabile Prof. A. Saetta

## RAPPRESENTAZIONE VETTORIALE DELLA VELOCITÀ MEDIA LUNGO LA LOS – ASC E DES

Consente di cogliere meglio l'effettiva direzionalità delle velocità e la loro intensità

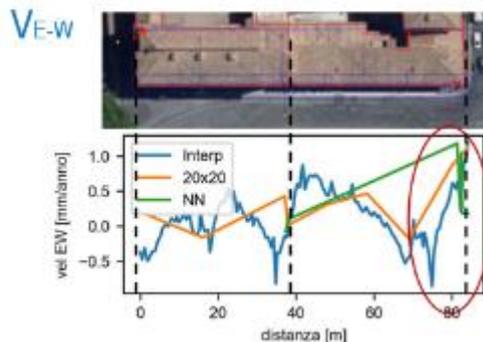
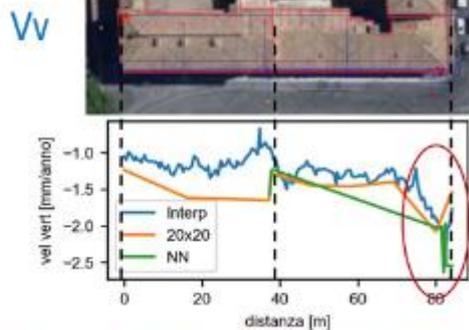


Vettori di velocità dei punti di misura delle due orbite ASC e DES

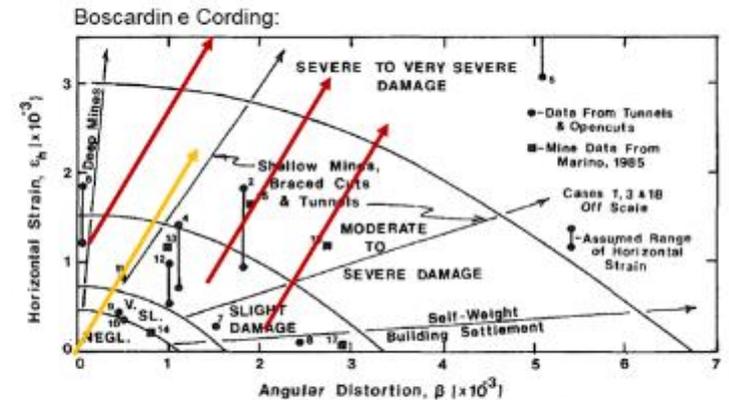
### CASO STUDIO - Complesso San Michele (Roma)



Verifica ed integrazione con lo stato di danno rilevato (*work in progress*)

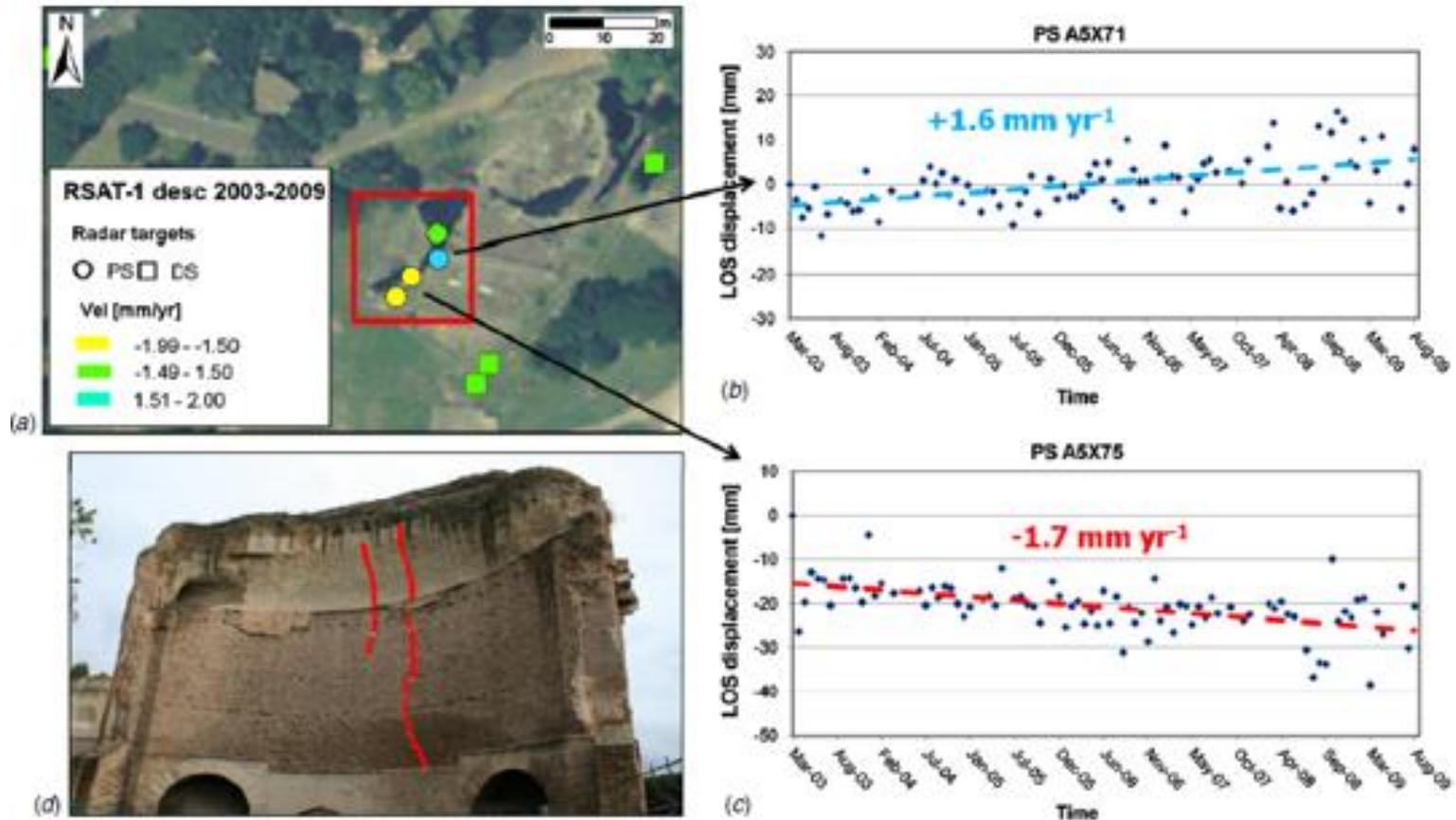


Stima del livello di danno attraverso correlazioni di letteratura.



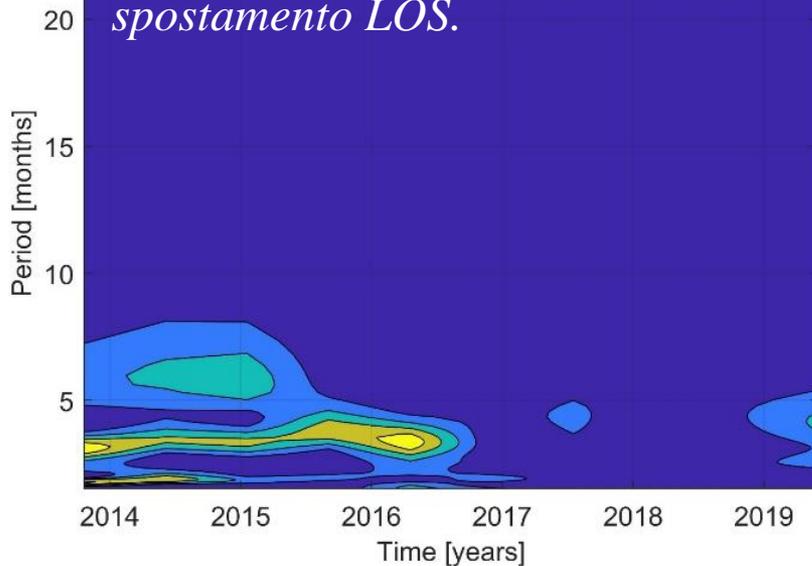
Università IUAV di Venezia - Responsabile scientifico: prof.ssa Anna Saetta  
 Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Responsabile scientifico: prof. Andrea Prota  
 Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Responsabile scientifico: prof. Alberto Meda

## POLIBA – UNIROMA1



Distribuzione dei punti di misurazione relativi ai dati RADARSAT-1 ascendenti per il muro dell'abside dei Bagni di Traiano. I PS mostrano: (b) uno spostamento LOS in avvicinamento dal satellite; (c) in allontanamento dal satellite; (d) fessure rilevate. (Tapete et al., 2012).

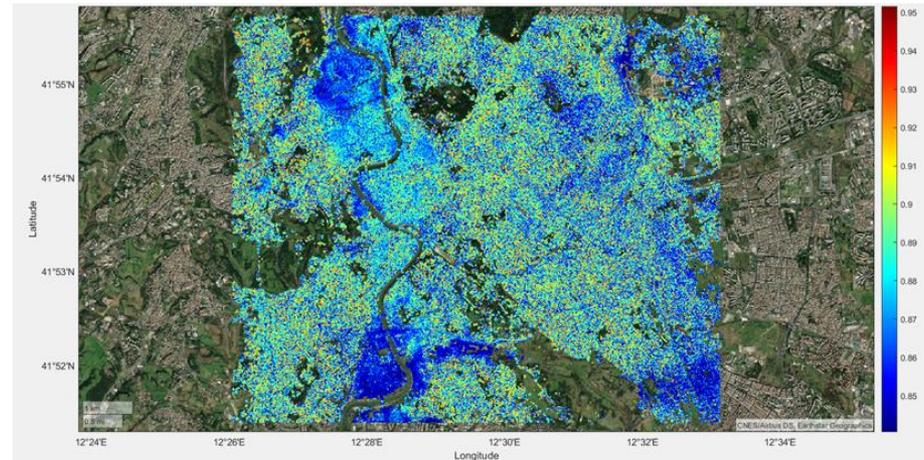
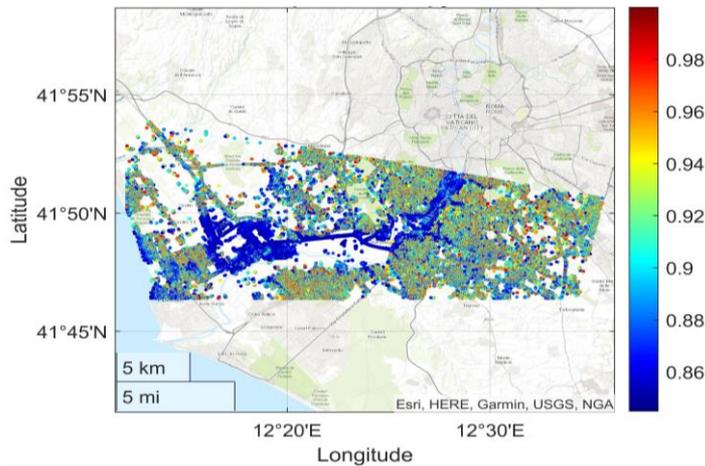
*Esempio di spettrogramma di spostamento LOS.*



## ELABORAZIONE DEI DATI NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA

POLITO

L'uso dell'entropia spettrale nel campo dello *Structural Health Monitoring* si basa sull'ipotesi che la presenza di danneggiamento incrementi la complessità del sistema (Farrar et al., 2010).



Esempio di rappresentazione di entropia spettrale di spostamento lungo la LOS:

## UR6-IUAV, UR3-UNINA, UR8-UNIROMA2

### CASO STUDIO N. 3 PONTE MORANDI ALLA MAGLIANA - (ROMA)



I  
- -  
U  
- -  
A  
- -  
V

Università Iuav  
di Venezia



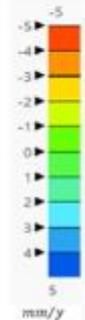
Velocità media di spostamento lungo la LOS



Dataset ascendente

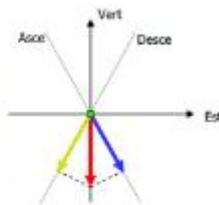


Dataset discendente



### Impiego di differenti tecniche di analisi:

Approccio Nearest Neighbours  
Punti «sufficientemente» vicini

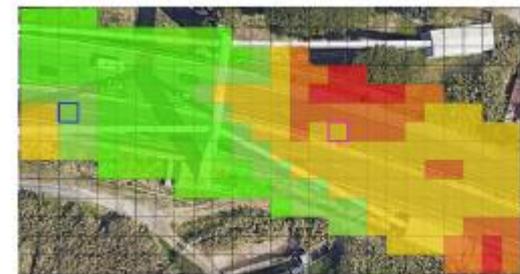


Sotto-campionamento su griglia regolare  
(grid-subsampling)

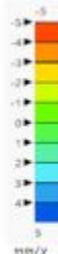


Velocità verticale

Interpolazione spaziale



Velocità verticale



Elaborazione interferometrica multitemporale SBAS-DInSAR a piena risoluzione spaziale di due dataset ascendenti (punti di misura verdi) e discendenti (punti di misura rossi)

100-400 punti/kmq in caso di utilizzo di sensori in banda C (ERS/ENVISAT),  
circa 8000 punti/kmq in caso di utilizzo di sensori in banda X (COSMO-SkyMed),



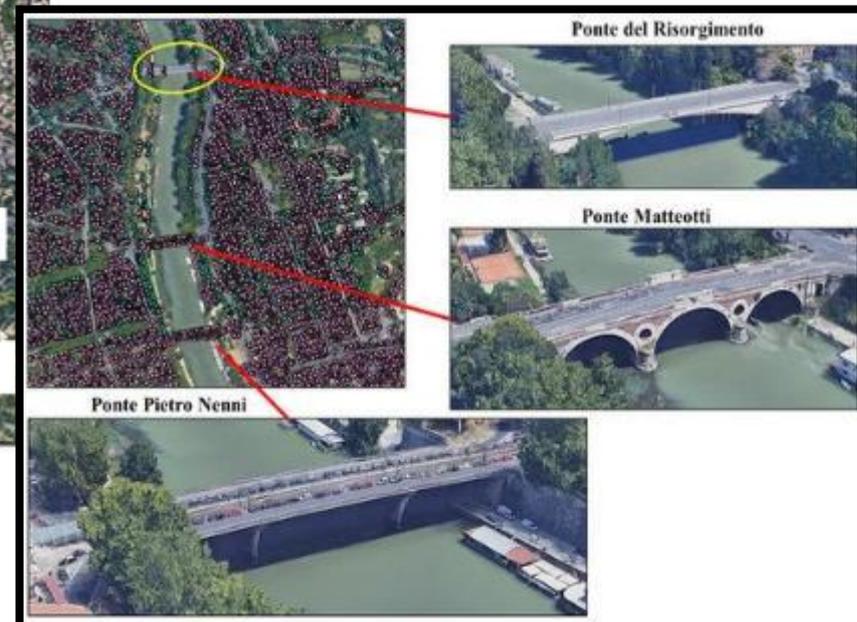
Limiti derivanti dalla procedura interferometrica  
Presenza di possibili **zone di «ombra» di punti di misura.**  
Scarsa coerenza dei punti riflettenti



**NON CI SONO DATI SATELLITARI SU TUTTI I PONTI CON IMPALCATO A MAGGIORE DEFORMABILITÀ STRUTTURALE**

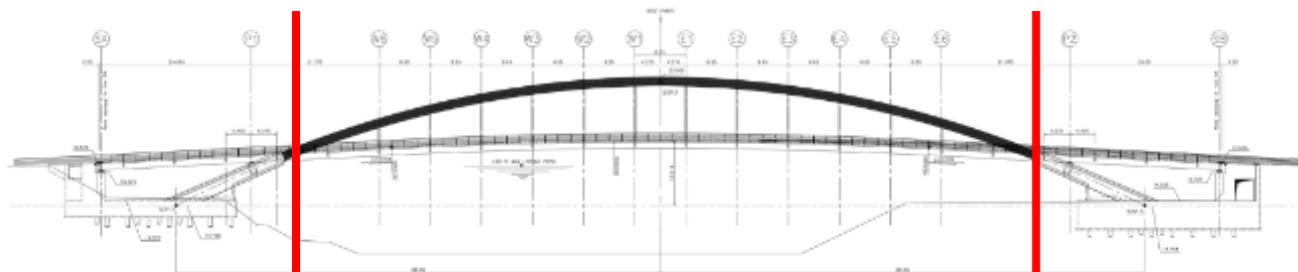
### ANALISI DELLE SERIE TEMPORALI DI SPOSTAMENTO LOS CON TECNICA MULTITEMPORALE A PIENA RISOLUZIONE SBAS-DinSAR

- Sequenze di acquisizioni SAR dalla costellazione italiana COSMO-SkyMed (Agenzia Spaziale Italiana)
- Serie temporali: 2011-2019



# CASO STUDIO: IL PONTE DELLA MUSICA

IL CASO STUDIO: PONTE DELLA MUSICA- ARMANDO TROVAJOLI (DATI SATELLITARI COMSO SKYMED)

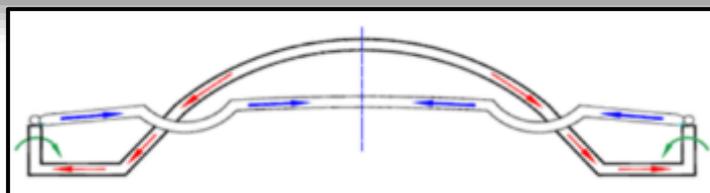


**ASSENZA DI DATI SATELLITARI SULLA CAMPATA CENTRALE DEL PONTE**

ORBITA ASCENDENTE



ORBITA DISCENDENTE



Legenda

**UNIBAS**

- vel [cm/yr] < -1.0
- -1.0 <= vel [cm/yr] < -0.8
- -0.8 <= vel [cm/yr] < -0.6
- -0.6 <= vel [cm/yr] < -0.4
- -0.4 <= vel [cm/yr] < -0.2
- -0.2 <= vel [cm/yr] < 0
- 0 <= vel [cm/yr] < 0.2
- 0.2 <= vel [cm/yr] < 0.4
- 0.4 <= vel [cm/yr] < 0.6
- 0.6 <= vel [cm/yr] < 0.8
- 0.8 <= vel [cm/yr] < 1.0
- vel [cm/yr] >= 1.0

## CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEL PONTE:

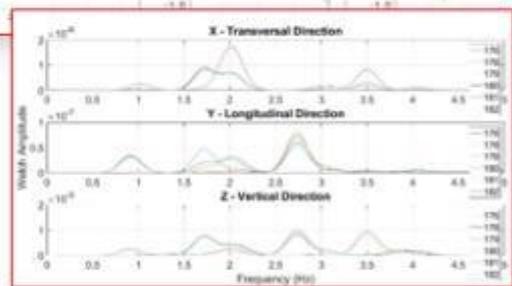
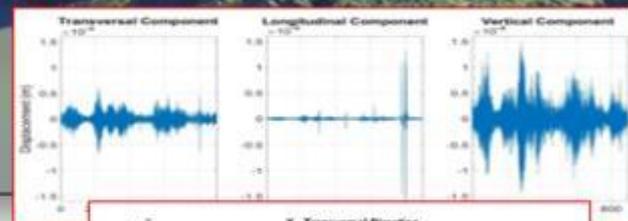
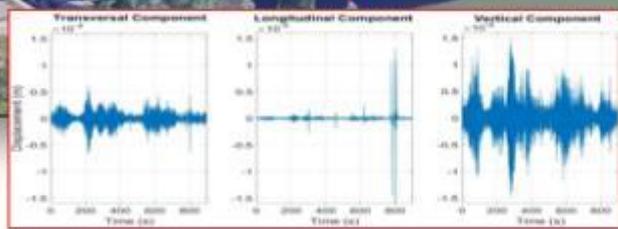
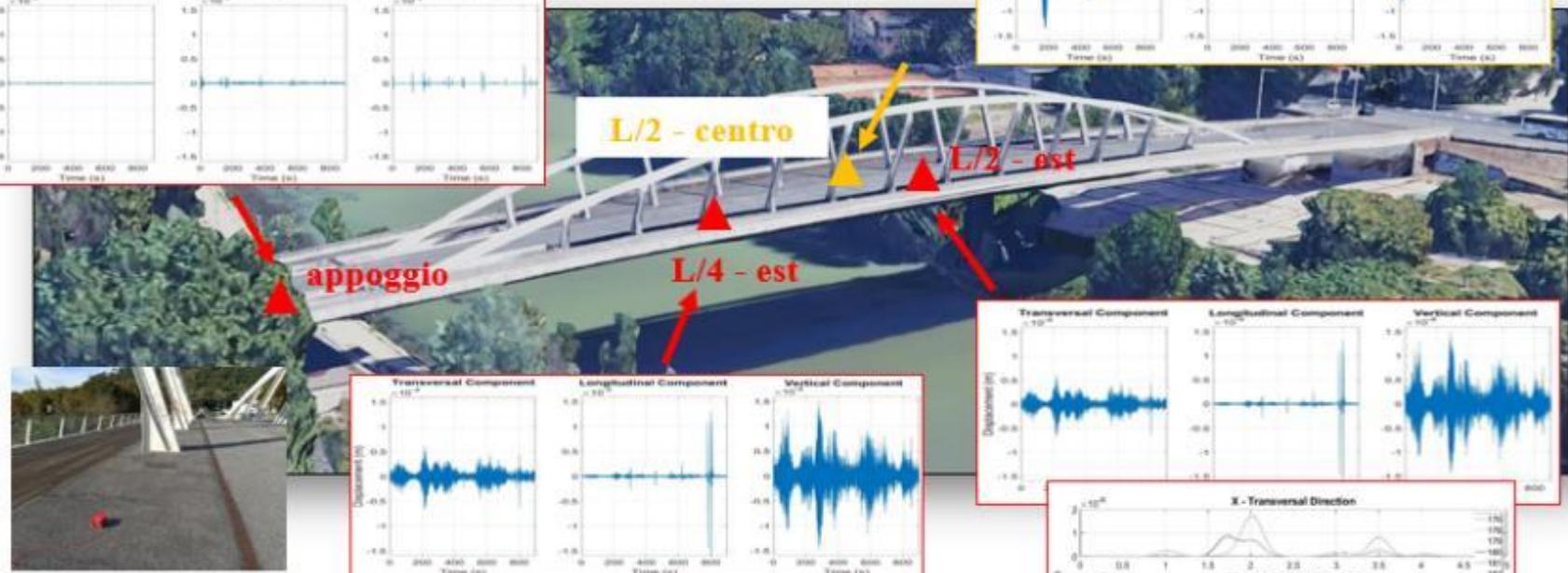
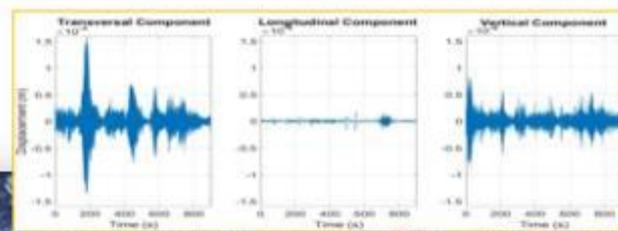
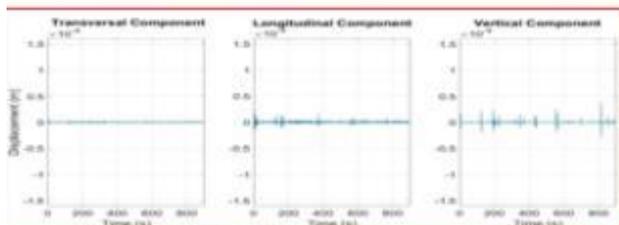
- Campata centrale  $\cong 130$  m;
- Campate di riva  $\cong 30$  m;
- Larghezza(0;L)  $\cong 17$  m;
- Larghezza(L/2)  $\cong 21$  m;

## CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI:

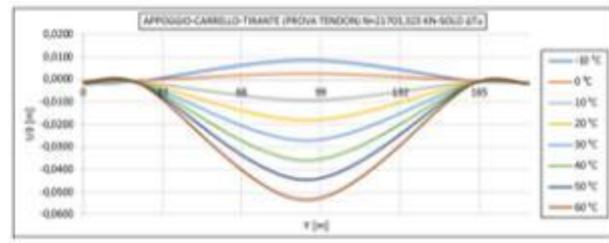
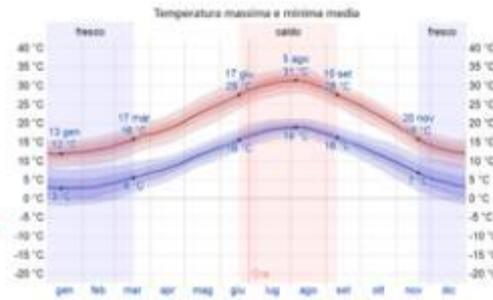
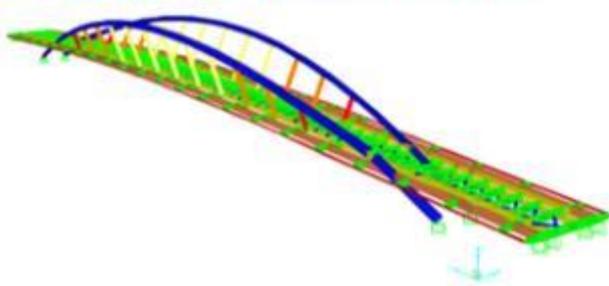
- Archi – goccia asimmetrica;
- Travi centrali – Sezione a Z;
- Travi di bordo – Sezione a cassone;
- Traversi – doppia flangia (h var.);
- Pendini – doppia flangia;
- Soletta – s=18 cm;
- Controventi inf. – UPN240

# CASO STUDIO: IL PONTE DELLA MUSICA

## Integrazione con sistemi on site di Identificazione dinamica



## Simulazione delle deformazioni indotte da fenomeni termici su modello calibrato



# CASO STUDIO: IL PONTE DELLA MUSICA

## MODELLAZIONE FEM E CALIBRAZIONE DINAMICA

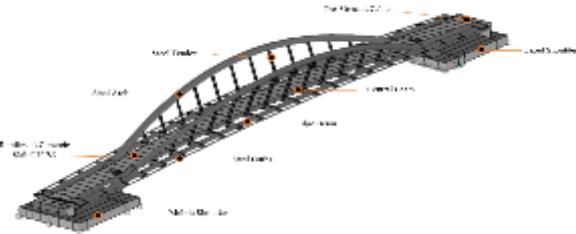
Numerico

Sperimentale

I Modo

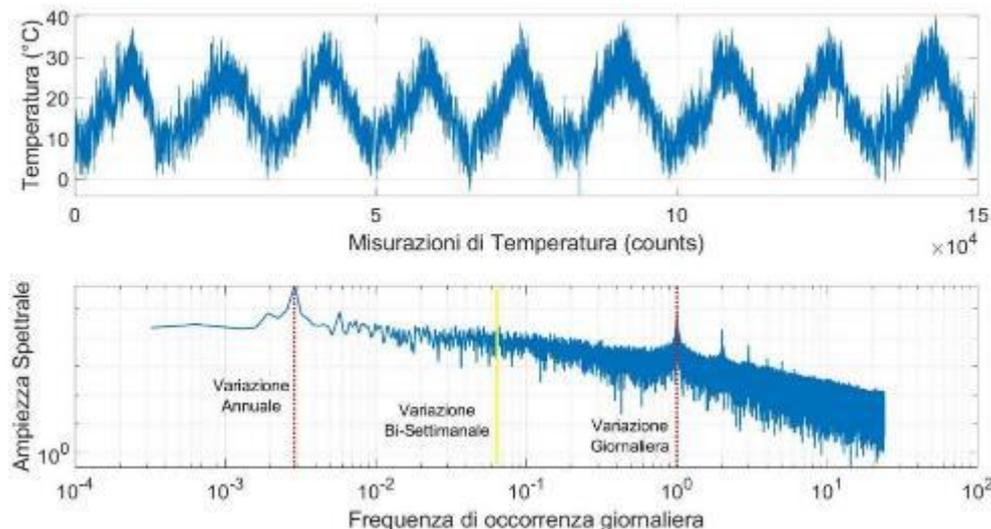
II Modo

III Modo



UNIBAS

	<i>Experimental</i>	<i>Optimal Numerical Model</i>	<i>Percentage Difference</i>
<i>Mode number</i>	<i>Frequency [Hz]</i>	<i>Frequency [Hz]</i>	<i>Rate [%]</i>
<i>Mode 1</i>	0.92±0.01	0.92	0±0.1
<i>Mode 2</i>	1.01±0.01	1.07	5.94±0.1
<i>Mode 3</i>	1.33±0.01	1.33	0±0.1

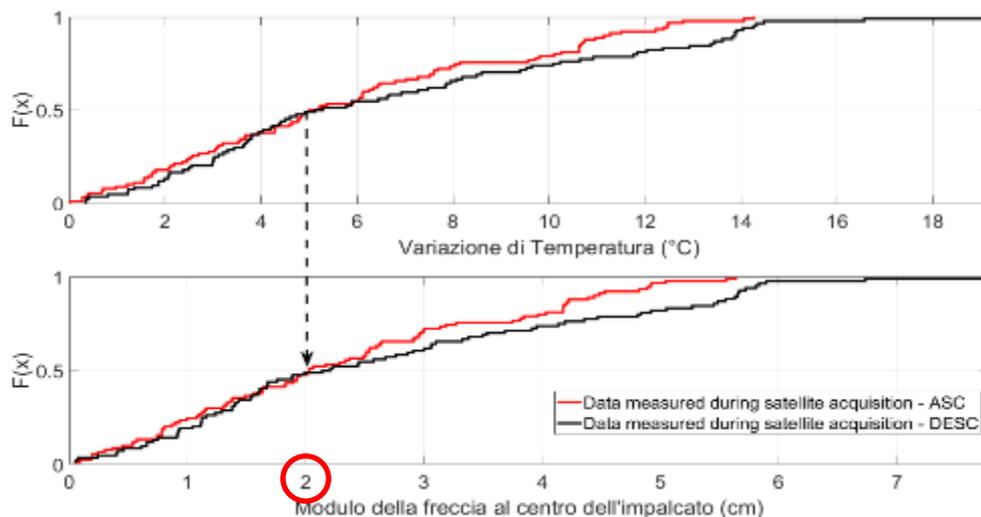


**FUNZIONI DI DISTRIBUZIONE DELLA DENSITÀ DI PROBABILITÀ CUMULATA IN TEMPERATURA E SPOSTAMENTO**

$$\Delta Z (cm) = 0.09 + 0.40 \times \Delta T (^\circ C)$$

Dove  $\Delta Z$  rappresenta la freccia valutata in corrispondenza della mezzeria e  $\Delta T$  rappresenta la variazione di temperatura rispetto alla temperatura media annuale

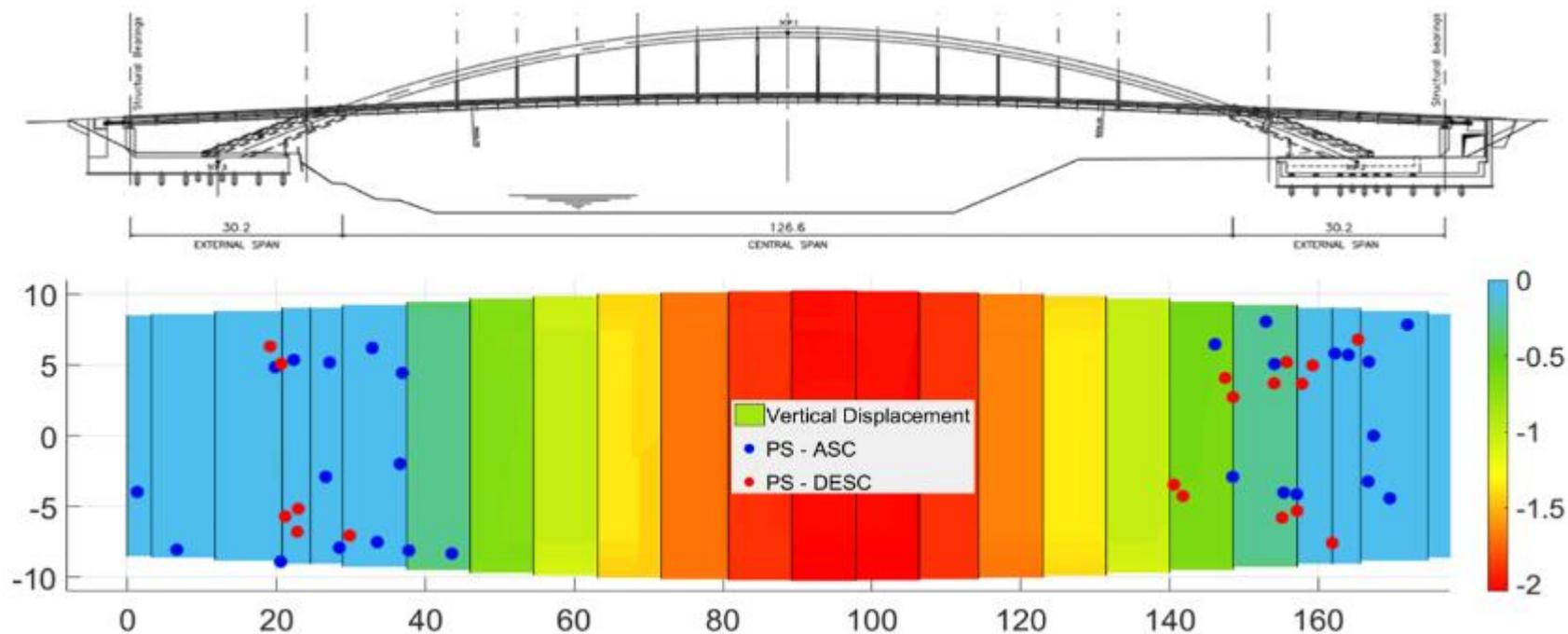
**(VARIAZIONE TEMP. NELL'INTERVALLO 12 ORE)**



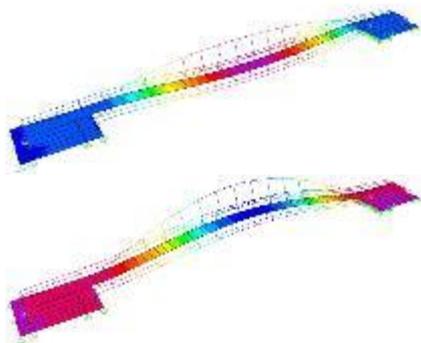
*La dipendenza dalla lunghezza d'onda ( $\lambda$ ) limita la possibilità di utilizzo del monitoraggio satellitare ai movimenti caratterizzati da intensità di spostamento che non superino nel periodo intercorrente tra un passaggio e il successivo il valore di un quarto della lunghezza d'onda  $\lambda / 4$  (pari a circa 7,5 mm in banda X)*

# CASO STUDIO: IL PONTE DELLA MUSICA

CONTOUR LEVEL DELLA DEFORMATA TERMICA CON VARIAZIONE DI TEMPERATURA DI  $|\Delta T|=5^{\circ}\text{C}$



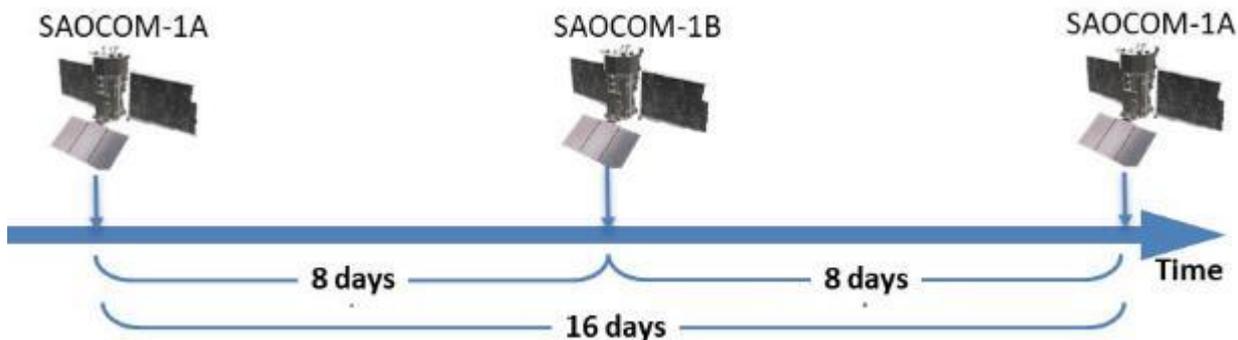
## Analisi Termo-Meccaniche



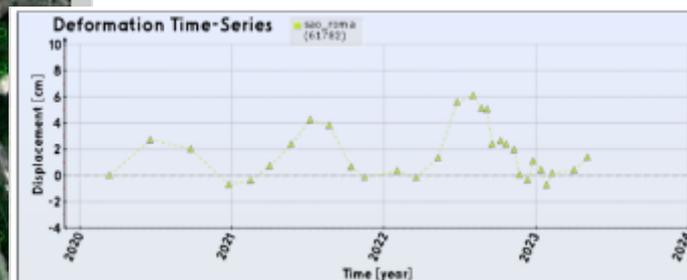
DESIGNAZIONE	INTERVALLO DI FREQUENZE IN GIGAHERTZ	INTERVALLO DI LUNGHEZZA D'ONDA IN CENTIMETRI
Banda L	0.390-1.550	76.9-19.3
Banda C	3.900-5.750	7.69-5.20
Banda X	5.75-10.90	5.20-2.75

Cosmo SkyMed  $\lambda=3.1 \text{ cm} \rightarrow \lambda / 4 = 0,775 \text{ cm}$

## Costellazione SAOCOM-1 (SAOCOM-1A e -1B)



- La costellazione argentina SAOCOM-1A e 1B e quella italiana COSMO-SkyMed formano il sistema SIASGE.
- Risoluzione spaziale (stripmap mode): **5 m x 5 m** (Single e Dual Pol) **5 m x 6 m** (Quad Pol), Copertura del suolo: **40-60 km** (Single e Dual Pol) **20-30 km** (Quad Pol) - **Banda L** ( $\lambda \sim 23.5$  cm) - La regione di esclusività dell'ASI include tutta l'Europa - **Lancio satelliti: 10/2018 (A) – 08/2022 (B)**



# CASO STUDIO: IL VIADOTTO PLATANO (VIETRI DI POTENZA-PZ)

## VIADOTTO PLATANO: STRUTTURA AD ARCO-TELAIO CON VIADOTTI D'ACCESSO IN C.A.P.



L'opera è costituita da un **arco-telaio d'acciaio** di grande luce, che supera la profonda incisione del torrente Platano, e dai due **viadotti d'accesso iperstatici** realizzati con impalcati a travi prefabbricate in c.a. precompresso.

La lunghezza dell'arco-telaio è pari a 302m (81m+140m+81m), il viadotto d'accesso, lato Salerno, è pari a 142,35 m suddiviso in 4 campate mentre il viadotto d'accesso, lato Potenza, è pari a 177,75m suddiviso in 5 campate per una lunghezza complessiva di 630m

firma del ing. Silvano Zorzi e del Ing. Sabatino Procaccia della IN.CO. S.p.a. di Milano (1971) - realizzato dalle imprese "Cooperativa Muratori e Cementisti" e "Costruzioni Metalliche A. Cimolai"



# CASO STUDIO: IL VIADOTTO PLATANO (VIETRI DI POTENZA-PZ)

## PERSISTENT SCATTERERS - SATELLITI ENVISAT E ERS 1-2



ENVISAT

### PROPRIETÀ:

- Sensori Radar in banda C con lunghezza d'onda 5.6 cm
- ERS-1 funzionante dal 1991 al 2000
- ERS-2 funzionante dal 1995 al 2011
- ENVISAT funzionante dal 2002 al 2012
- Modalità stripmap HIMAGE con risoluzione spaziale 5x20 km
- Raccolte su lunghe strisce continue di 100 km
- Riving time: 35 giorni

### Dati forniti dal ministero dell'ambiente e territorio:

ERS dal 1992 al 2000

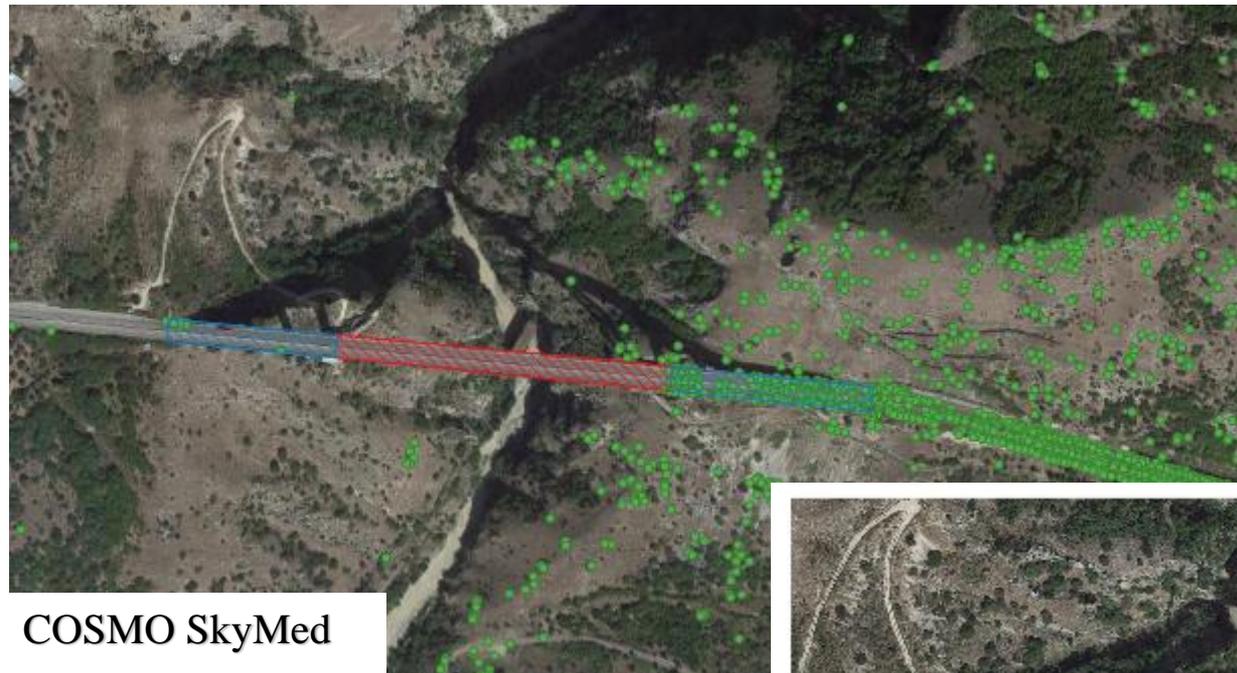
ENVISAT dal 2002 al 2010



ERS 1-2

# CASO STUDIO: IL VIADOTTO PLATANO (VIETRI DI POTENZA-PZ)

## PERSISTENT SCATTERERS E MAPPA DI VELOCITÀ DELLA COSTELLAZIONE COSMO SKYMED (DATI 2011-2013)



### PROPRIETÀ:

- Sensori Radar in banda x con lunghezza d'onda 3.1 cm
- Primo satellite in funzione dal 2007 (in corso)
- Modalità stripmap HIMAGE con risoluzione spaziale 3x3 km
- Raccolte su lunghe strisce continue di 40 km
- Riviving time: 16 giorni

### Dati forniti dal ministero dell'ambiente e territorio:

Costellazione COSMO Sky MED dal 2011 al 2013

COSMO SkyMed

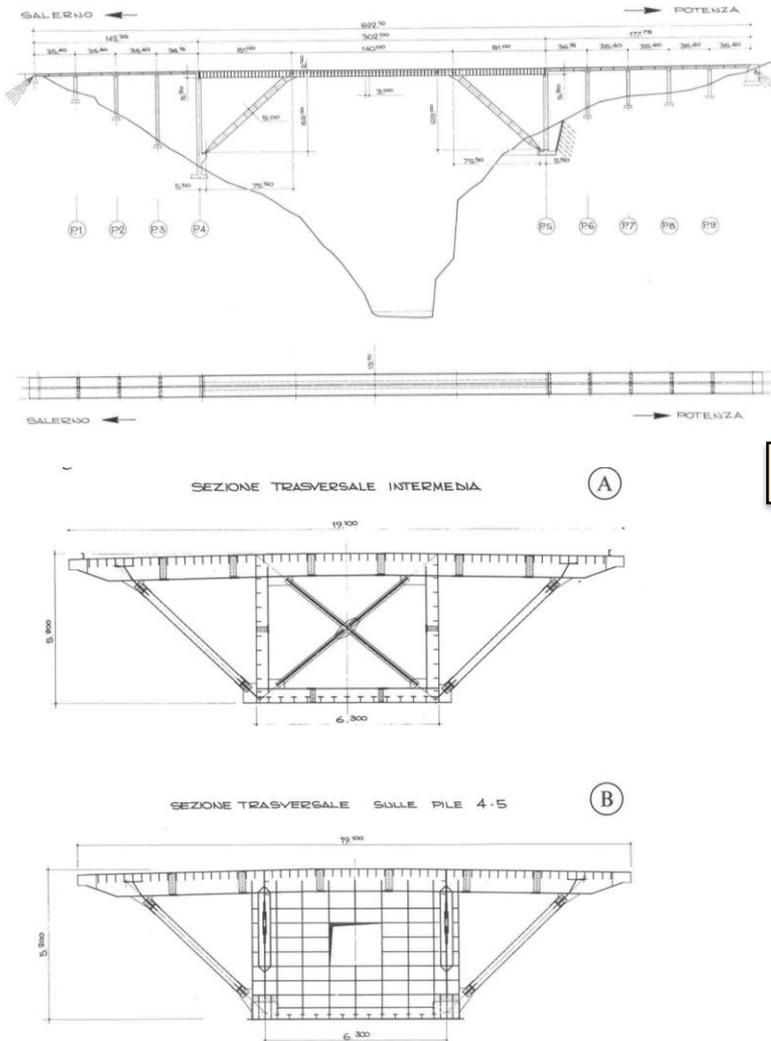


### MAPPA DI VELOCITÀ Costellazione COSMO SkyMed Dati 2011-2013 (orbita discendente)

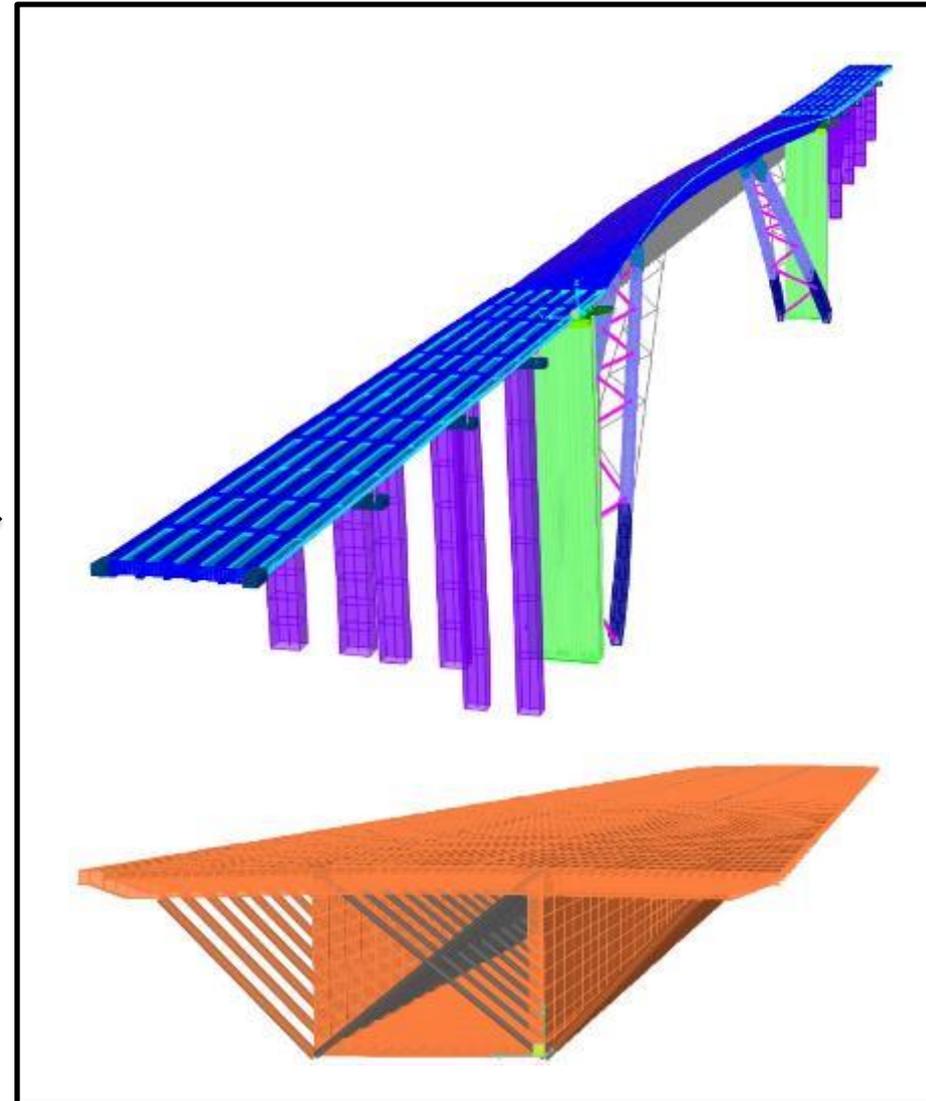
- Nessun PS sulla campata centrale dell'arco telaio
- Presenza di valori negativi sul viadotto d'accesso lato Potenza (allontanamenti dal satellite)

# CASO STUDIO: IL VIADOTTO PLATANO (VIETRI DI POTENZA-PZ)

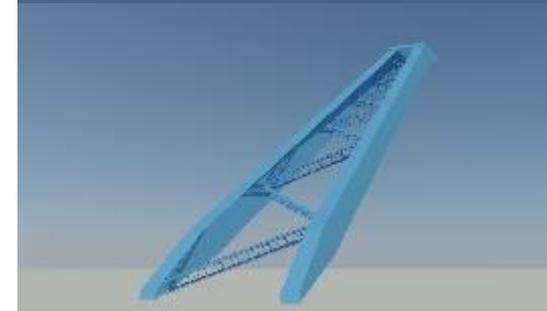
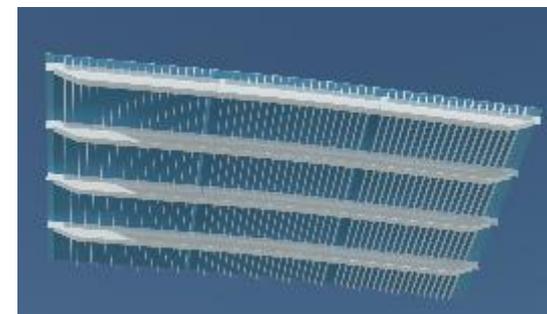
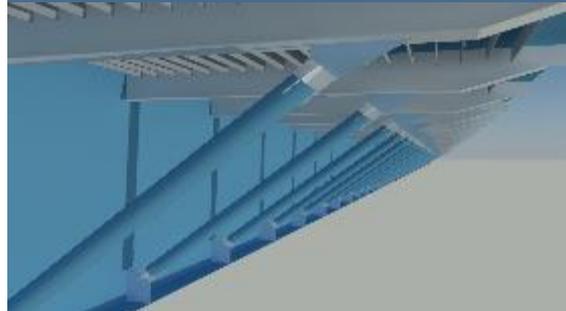
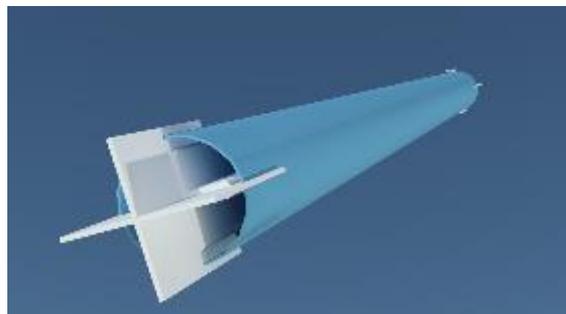
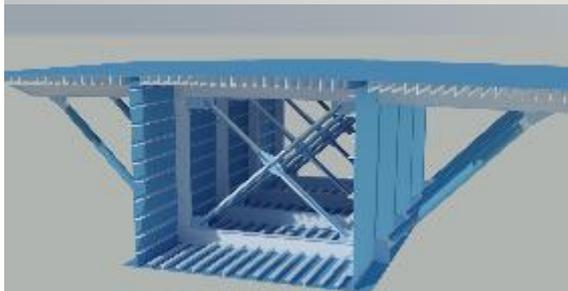
## ➤ DOCUMENTAZIONE PROGETTUALE



## ➤ MODELLO FEM – VIADOTTO PLATANO

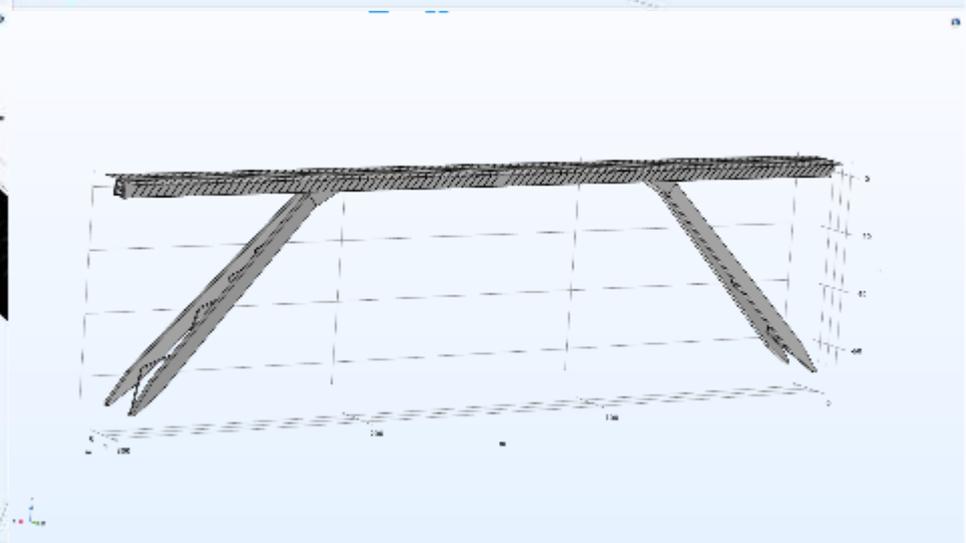
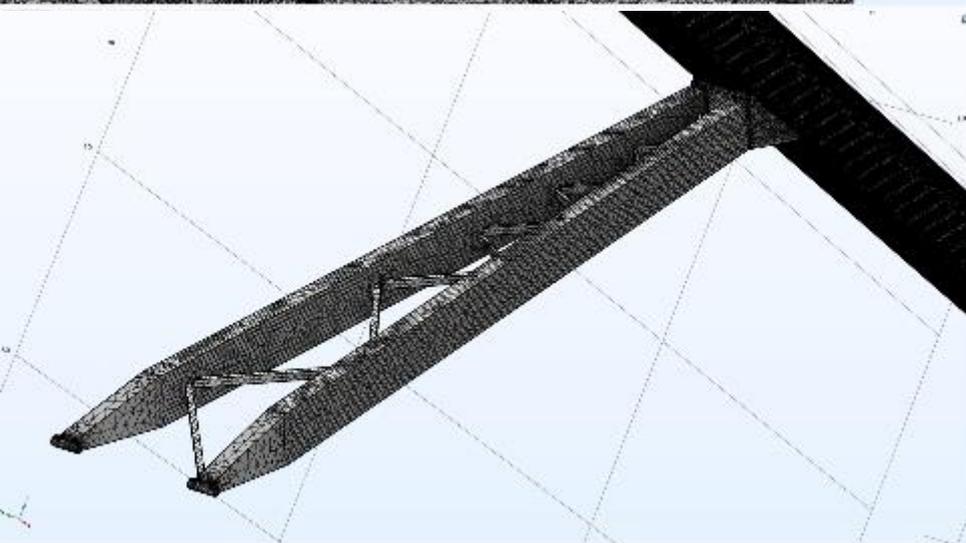
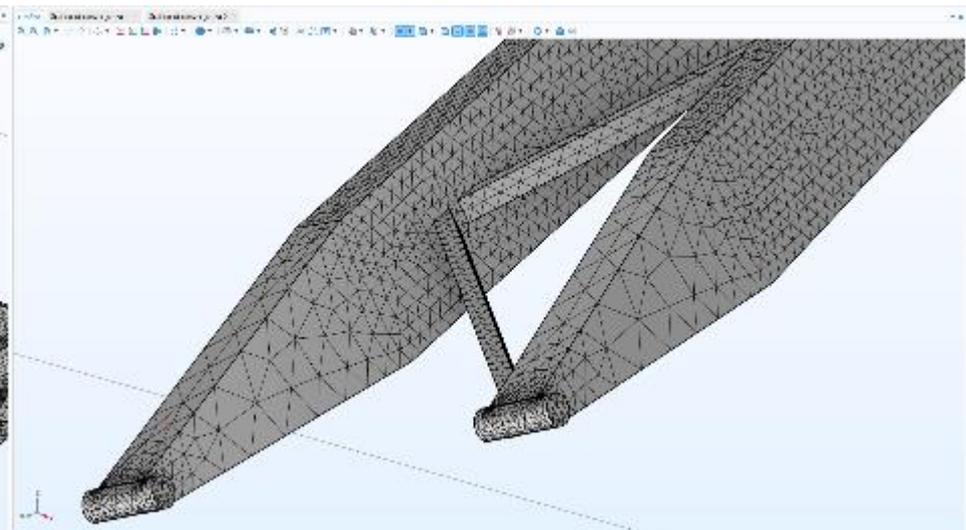
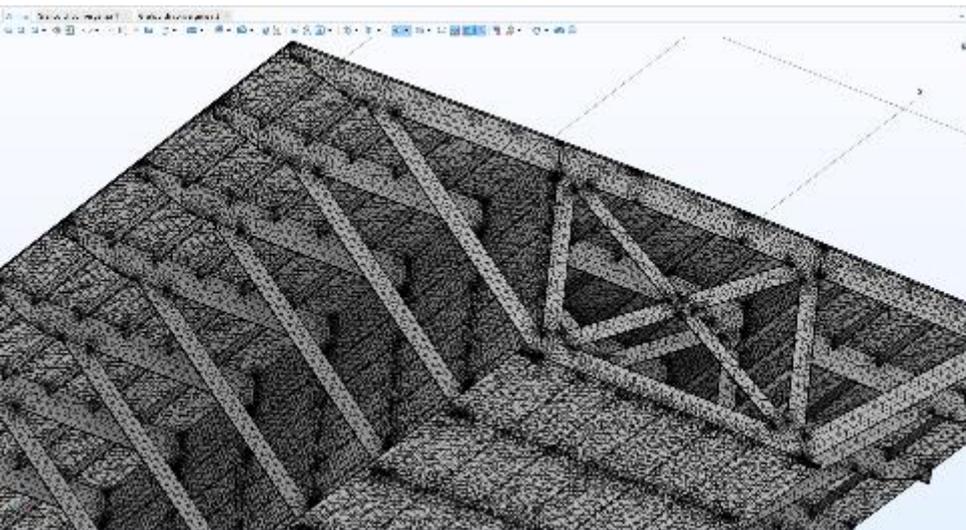


## MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE VIADOTTO PLATANO: RENDER SOFTWARE AUTOCAD



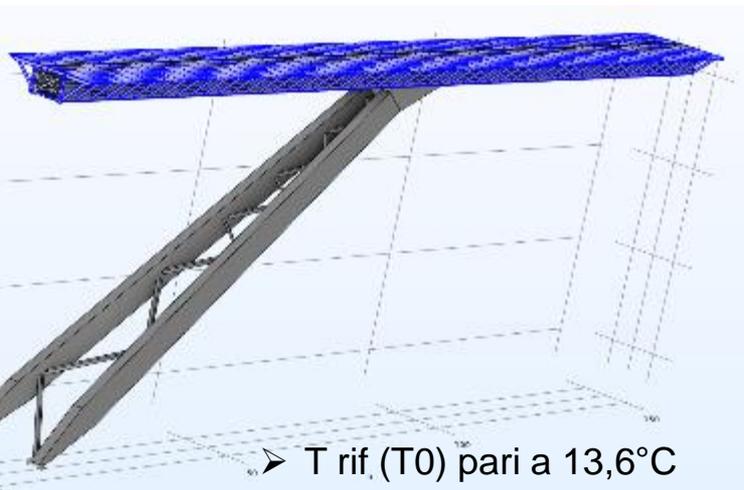
# CASO STUDIO: IL VIADOTTO PLATANO (VIETRI DI POTENZA-PZ)

## MODELLAZIONE TRIDIMENSIONALE VIADOTTO PLATANO: SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS



## STUDIO 1: TRASMISSIONE DEL CALORE

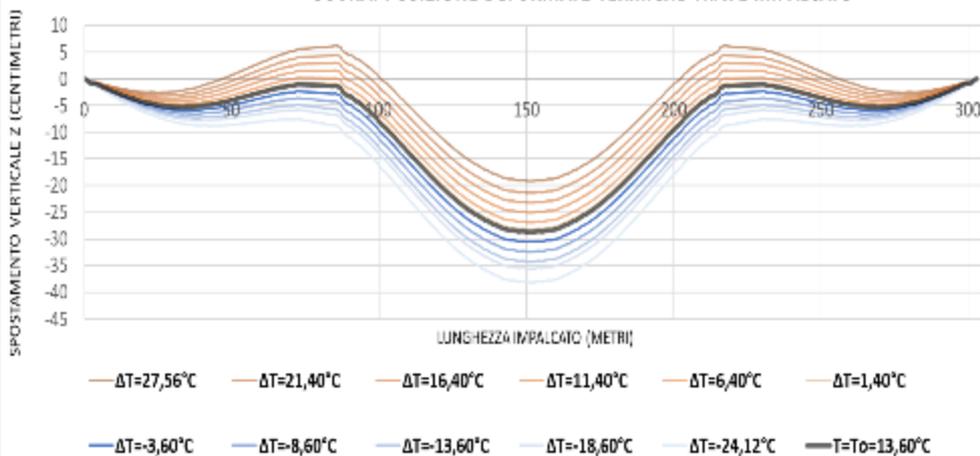
IL MODELLO:



➤ T rif. (T0) pari a 13,6°C

I RISULTATI DELL'ANALISI: DEFORMATA PER EFFETTO DELL'AZIONE TERMICA E DEI CARICHI PERMANENTI

SOVRAPPOSIZIONE DEFORMATE TERMICHE TRAVE IMPALCATO



Con effetto dell'irraggiamento)

ΔT (°C)	SENZA IRRAGGIAMENTO	CON IRRAGGIAMENTO
	Δ SPOSTAMENTO MAX IN MEZZERIA (cm)	Δ SPOSTAMENTO MAX IN MEZZERIA (cm)
27.56	9.58	12.95
21.4	7.35	10.69
16.4	5.51	8.84
11.4	3.67	7.00
6.4	1.83	5.16
1.4	0.52	-
0	0.00	-
-3.6	-1.86	-
-8.6	-3.70	-
-13.6	-5.54	-
-18.6	-6.86	-
-24.12	-9.42	-

Cosmo SkyMed  $\lambda=3.1$  cm  $\rightarrow \lambda / 4 = 0,775$  cm

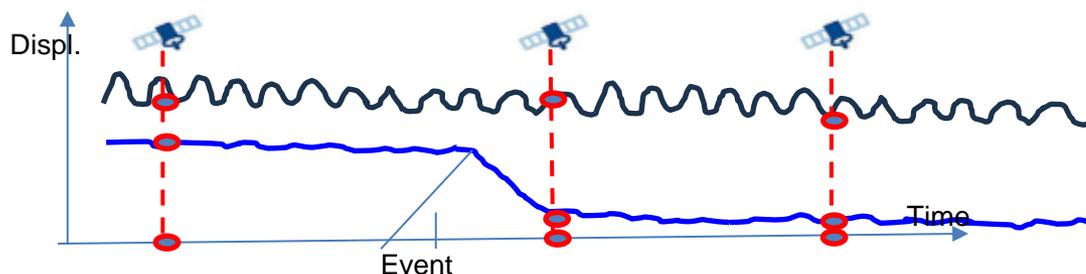
Sentinel (Banda C)  $\lambda=5.6$  cm  $\rightarrow \lambda / 4 = 1,4$  cm

## VANTAGGI INTERFEROMETRIA SATELLITARE

- Possibilità di monitorare **grandi porzioni di territorio**.
- Possibilità di utilizzare **storie temporali pregresse** (almeno 10 anni) utili per comprendere l'evoluzione di un fenomeno di interesse.

## TUTTAVIA

- **Elevato intervallo di tempo di rivisitazione dei satelliti**, dell'ordine mediamente delle settimane, che permette quindi di monitorare efficacemente solamente fenomeni deformativi lenti caratterizzati da un periodo di sviluppo ben superiore a quello di campionamento.



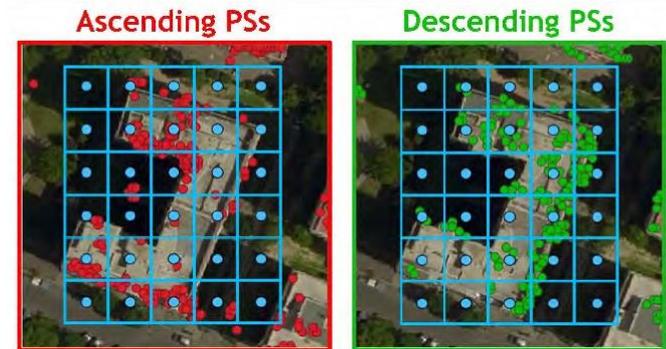
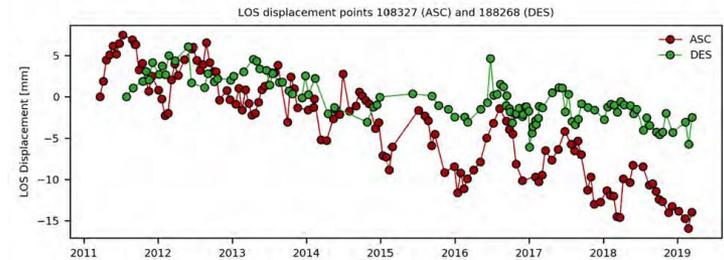
- **Elevata deformabilità** strutturale per effetti termici può limitare l'efficacia dei sensori satellitari.

Bande dei sistemi radar	Intervallo di frequenze [GHz]	Intervallo di lunghezze d'onda [cm]
Banda L	1-2	30-15
Banda C	4-8	7.5-3.75
Banda X	8-12	3.75-2.4

- Gli effetti della **deformazione termica**, inoltre, devono essere opportunamente considerati anche nelle operazioni di **composizione vettoriale** dei dataset appartenenti alle due orbite ascendente e discendente.
- **Localizzazione del punto di misura (PS)**, caratterizzata dalle precisioni dell'ordine del metro (COSMO-SkyMed), che può variare in dipendenza delle caratteristiche dei sistemi SAR considerati, inferiore a quella dei sistemi classici di monitoraggio on-site.

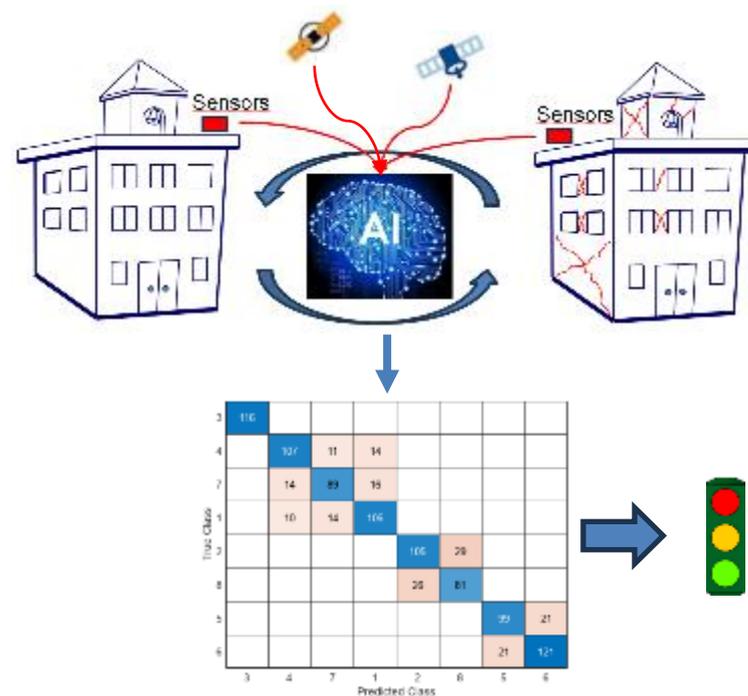
# CONSIDERAZIONI SULL'UTILIZZO DEI DATI SATELLITARI

- La condizione per cui due geometrie di acquisizione satellitare (ad es. orbita ascendente e discendente dello stesso satellite) identifichino lo stesso punto di misura risulta verificata raramente. Per poter effettuare la composizione del moto è necessario procedere, a patto che sussistano le condizioni, a un **ricampionamento spaziale** ed eventualmente **temporale dei dati** ottenuti nelle due geometrie di acquisizione.
- **L'interpolazione spaziale** fornisce risultati effettivamente rappresentativi degli spostamenti reali solo quando la tipologia del fenomeno deformativo osservato è caratterizzata da una **distribuzione spaziale di spostamenti correlati** nello spazio.
- Difficoltà intrinseche di molti degli attuali sistemi satellitari ad acquisire informazioni lungo direzioni prossime alla direttrice N-S.
- In alcuni casi particolarmente sfavorevoli l'insorgere di fenomeni patologici su strutture o infrastrutture potrebbe avvenire anche per ampiezze di spostamento **inferiori all'errore associato alla misura satellitare**, diventa di fondamentale importanza poter prevedere misure e **sistemi di monitoraggio on-site** quando il monitoraggio satellitare indica che gli spostamenti rilevati sono tali da poter potenzialmente causare danni alle strutture.
- la LOS di entrambe le orbite ascendenti e discendenti è sostanzialmente contenuta nel piano verticale E-W, spostamenti in direzione N-S non rilevabili;



RESAMPLING GRID  
spatial resolution (10x10) m

- Integrazione dati forniti da costellazioni satellitari operanti in bande di lunghezza d'onda differenti (**Analisi Multi-Frequenza**);
- Sviluppo di Algoritmi (Machine Learning) per stimare lo stato di salute delle strutture a partire dall'**integrazione dei dati satellitari con quelli on-site**;
- Definizione di **soglie di comportamento patologico** basandosi anche su modelli digitali opportunamente addestrati (**Supervised Learning**), aggiornabili con i dati sperimentali;
- Definizione di tecniche di **interpolazione spaziale physic-based** per ovviare, ove ricorrono le condizioni, all'assenza di dati satellitari su porzioni di strutture;
- Rendere maggiormente robusto il sistema strategico di **supporto alle decisioni**;
- Filosofia di manutenzione: approccio **condition-based maintenance** sostituisce quello **time-based maintenance**.



<https://www.reluis.it/images/stories/Linee%20Guida%20Satellitari-capitoli%201-4%20BOZZA.pdf>

Si ringrazia l'Agencia Spaziale Italiana (ASI) per l'utilizzo dei dati Cosmo SkyMed e il CNR IREA per le elaborazioni con la tecnica DinSAR - SBAS

The image shows the cover of a technical document. At the top left is the ReLuis logo, which consists of a red waveform and the word 'reluis' in a blue script font. To its right is the logo of CNR-IREA, featuring a stylized figure and the text 'Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente'. Below these logos, the text 'ReLUIS Consorzio Interuniversitario Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica e strutturale' is written in a small, black, sans-serif font. To the right of this, the text 'CNR-IREA Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente' is also in a small, black, sans-serif font. In the center of the page, the title 'LINEE GUIDA PER L'UTILIZZO DEI DATI INTERFEROMETRICI SATELLITARI AI FINI DELL'INTERPRETAZIONE DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE DELLE COSTRUZIONI' is printed in a bold, black, sans-serif font. Below the title, the date 'Ottobre 2023' is written in a red, sans-serif font, followed by 'Documento sottoposto a inchiesta pubblica' in a red, sans-serif font. Further down, the text 'Il documento è sottoposto a inchiesta pubblica fino al 15 Novembre 2023' and 'Commenti possono essere inviati all'indirizzo mail: wp6@reluis.it' are written in a smaller, black, sans-serif font. At the bottom left, the text 'con il supporto di' is written in a small, black, sans-serif font, followed by the logo of the Protezione Civile, which includes the Italian coat of arms and the text 'PROTEZIONE CIVILE Presidio del Consiglio dei Ministri Dipartimento della Protezione Civile'.

**ReLUIS**  
Consorzio Interuniversitario  
Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e strutturale

**CNR-IREA**  
Consiglio Nazionale delle Ricerche  
Istituto per il Rilevamento  
Elettromagnetico dell'Ambiente

**LINEE GUIDA PER L'UTILIZZO DEI DATI INTERFEROMETRICI  
SATELLITARI AI FINI DELL'INTERPRETAZIONE DEL  
COMPORTAMENTO STRUTTURALE DELLE COSTRUZIONI**

Ottobre 2023  
Documento sottoposto a inchiesta pubblica

Il documento è sottoposto a inchiesta pubblica fino al 15 Novembre 2023  
Commenti possono essere inviati all'indirizzo mail: [wp6@reluis.it](mailto:wp6@reluis.it)

con il supporto di

**PROTEZIONE CIVILE**  
Presidio del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



# SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

## GRAZIE PER LA CORTESE ATTENZIONE

Bologna, 9-11 ottobre 2024

**Il monitoraggio vibrazionale on-site e l'utilizzo di dati satellitari per il monitoraggio di strutture ed opere infrastrutturali (Parte 2)**