

# Sistemi da Satellite per il Monitoraggio dei Fenomeni Franosi



**Guido Pasquariello**

CNR Consiglio Nazionale delle Ricerche , ISSIA, BARI

- ✓ Sistemi basati su piattaforme Spaziali per l'Interferometria SAR Multi Temporale (Multi temporal SAR Interferometry MTI) per il monitoraggio dell'instabilità dei versanti
- ✓ Analisi dei parametri caratteristici
- ✓ Esempi di SAR in C-band e X-band
- ✓ Considerazioni conclusive

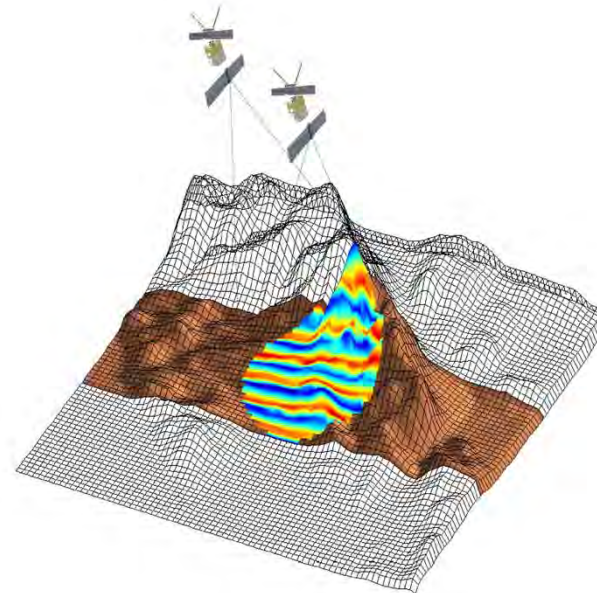
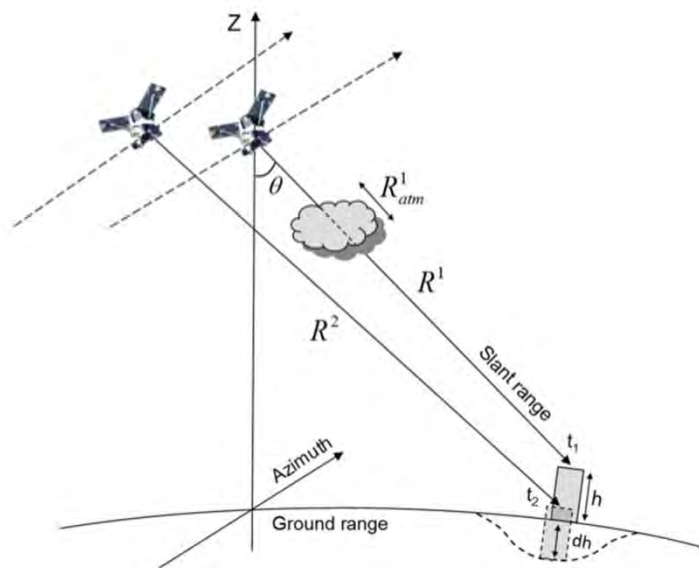
# Interferometria SAR Multi Temporale

- ✓ Strumento di misura che sta diventando sempre più operativo per l'analisi dei movimenti superficiali terrestri
- ✓ MTI come sorta di rete di stazioni GPS “naturali” per il monitoraggio di vaste aree di interesse, con una frequenza di aggiornamento del dato settimanale/mensile e una densità spaziale di punti di misura estremamente elevata (\*)

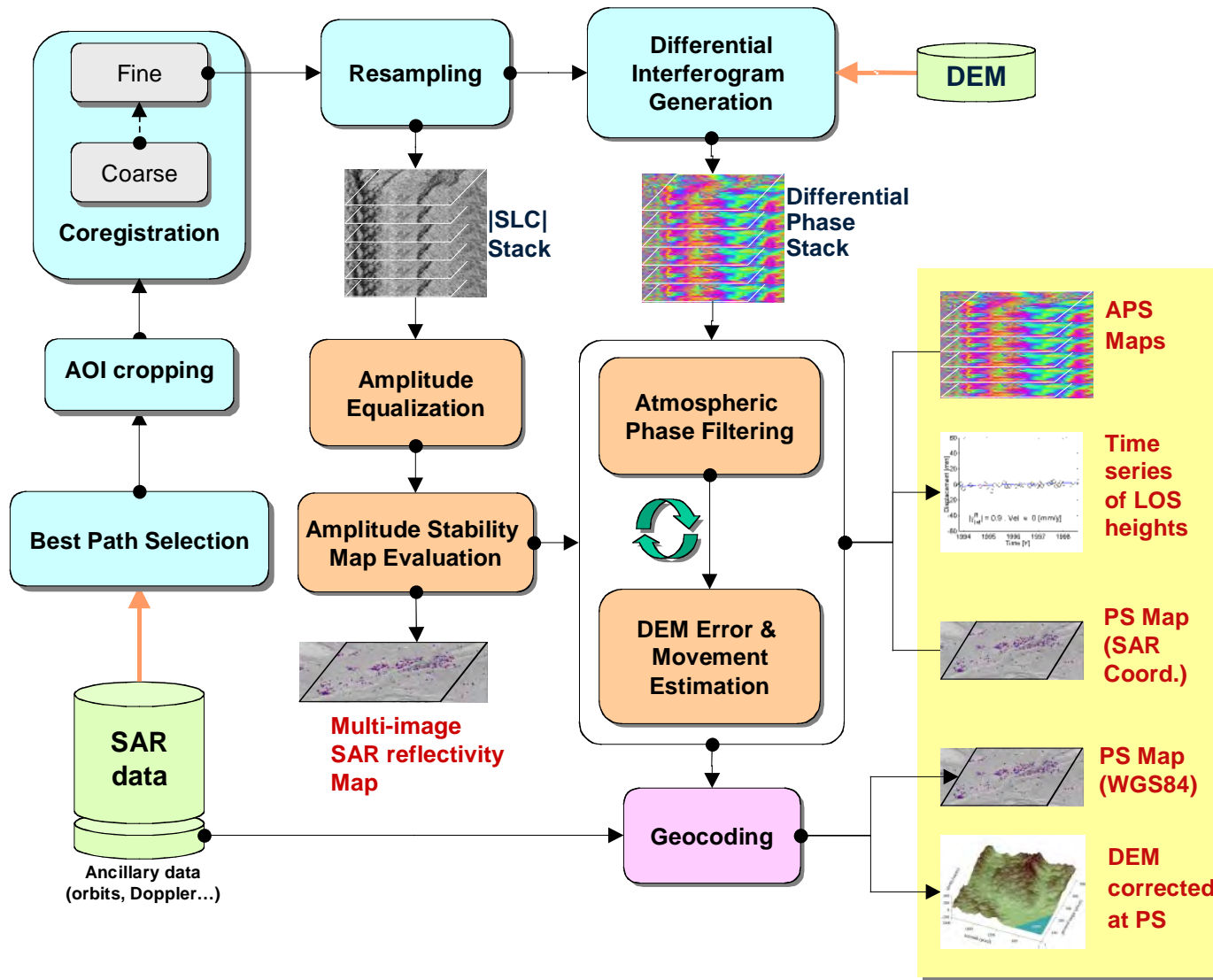
(\*) Arpa Piemonte - Nota tecnica sintetica per la comprensione del dato satellitare PSiNSAR

# SAR Interferometry

- ✓ Confrontando la fase immagini SAR acquisite da posizioni / tempi differenti del satellite è possibile ottenere mappe di **Elevazione del suolo** e **Spostamenti del suolo**
  - Misure globali.
  - Misure accurate (velocità  $\approx 1\text{mm/y}$ ).
  - Misure ripetute per lunghi periodi temporali (decenni) e con frequenza tra  $6 \div 35$  giorni.



# SPINUA Processing Chain



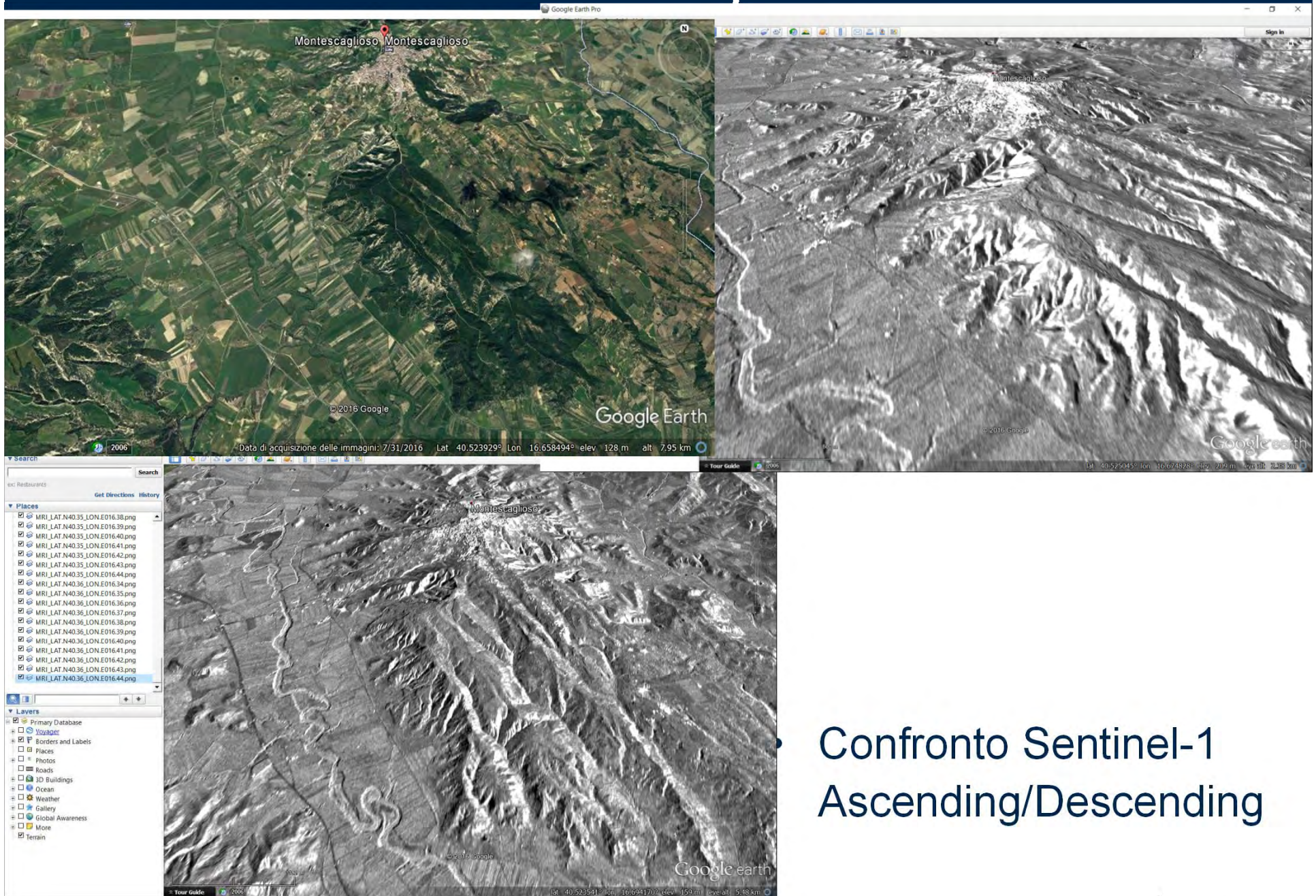
# Dipendenza delle stime di spostamento dai parametri del sistema

- ✓ L'interferometria multi temporale consiste in un doppio processo di interpolazione statistica:
  - Nello spazio per ciascuna immagine (per la rimozione dell'effetto atmosferico): dipendenza dal numero PS ( $N_{PS}$ ),
    - dipendenza dalla risoluzione spaziale;
  - Nel tempo per ciascun PS (per la stima dei parametri del moto) : dipendenza dal numero N di immagini temporali processate
    - dipendenza dalla risoluzione temporale  $dt$

- ✓ L'applicazione della MTI al monitoraggio delle frane pone alcune problematiche non del tutto risolte, dovute:
  - alla complessa cinematica del fenomeno sotto osservazione
  - Aree target spesso in situazioni non favorevoli:
    - Estensione limitata
    - Topografia sfavorevole
    - Presenza di vegetazione
    - Variabilità temporale nella copertura del suolo
  
- ✓ **Problemi :**
  - Visibilità della zona target
  - Mancanza di un numero sufficiente di scatteratori coerenti
  - Dipendenza dalla geometria direzione versante/angolo di osservazione;
  - Precisione nella determinazione della velocità media
  
- ✓ Analisi di performance (dipendenza dai parametri del sistema di acquisizione)



# Geometria di acquisizione

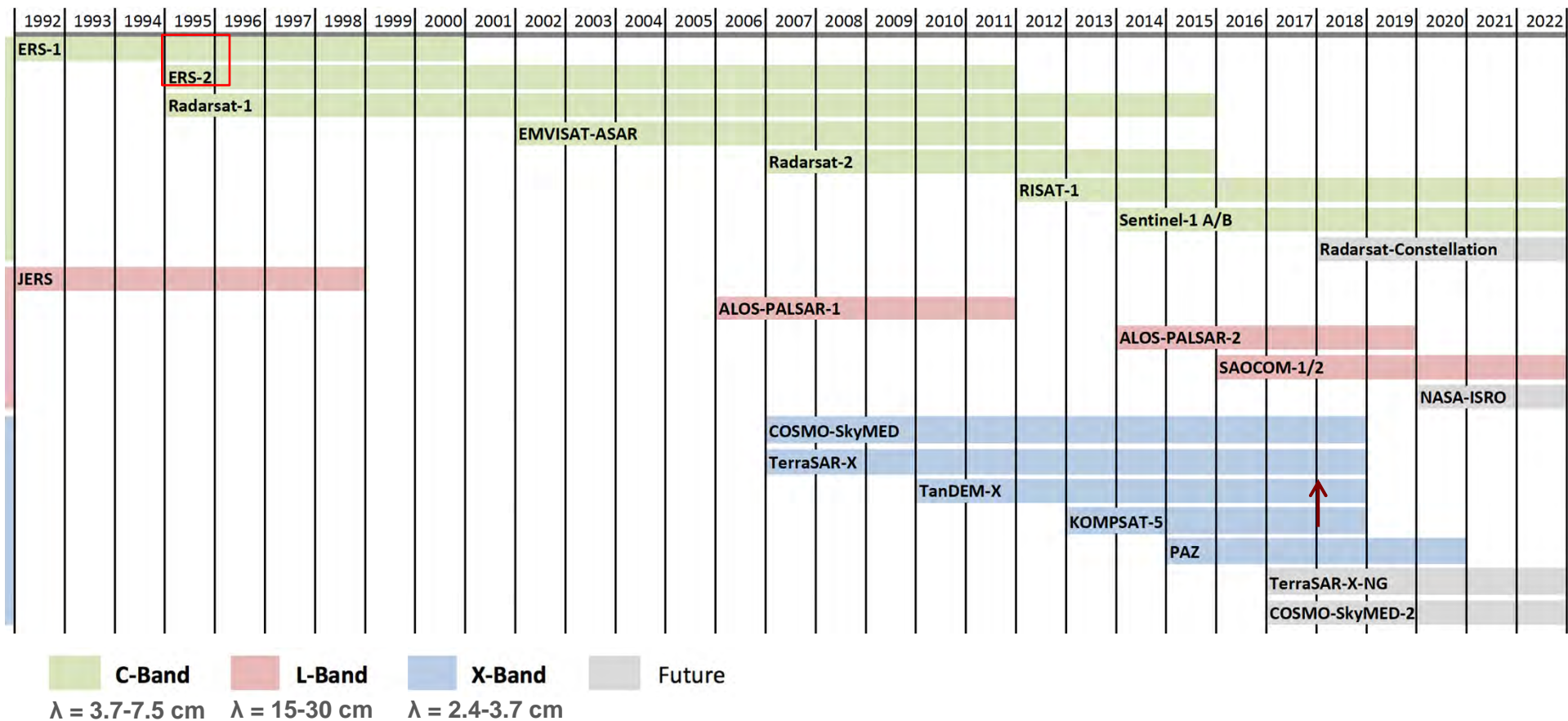


Confronto Sentinel-1  
Ascending/Descending



# SAR satellite missions

- SeaSat (1978)
- Shuttle Imaging Radar (dal 1981)
- SIR-C/X-SAR (1994 ) JPL-DLR-ASI)



# Limiti MTI nel monitoraggio frane

## LIMITI

- Non prevedibilità a priori della densità di PS (numero  $N_{PS}$  e distribuzione spaziale)
- Tecnica applicabile a movimenti lenti ( $v_{max} \leq \lambda/4 \cdot 1/dt$ )
- Accuratezza nella stima del moto dipendente dal numero  $N$  di acquisizioni temporali
- Movimenti 1-D lungo la linea di vista del sensore
- Coerenza inversamente proporzionale alla baseline spaziale  $B$
- NON univocità dell'interpretazione delle serie temporali (problema matematicamente mal posto)



## POSSIBILI SOLUZIONI

- Alta risoluzione spaziale; uso di scatteratori artificiali;
- scelta opportuna di  $\lambda$  ( $\delta\phi \propto \delta s/\lambda^2$ )
- scelta periodo di rivisita  $dt$
- 2-D usando ascending e descending e modelli topografici accurati dell'area target
- Sistemi Spaziali che assicurino bassa varianza nella distribuzione di  $B$
- Interpretazione fortemente guidata dalla conoscenza a priori del fenomeno

# InSAR satellite missions

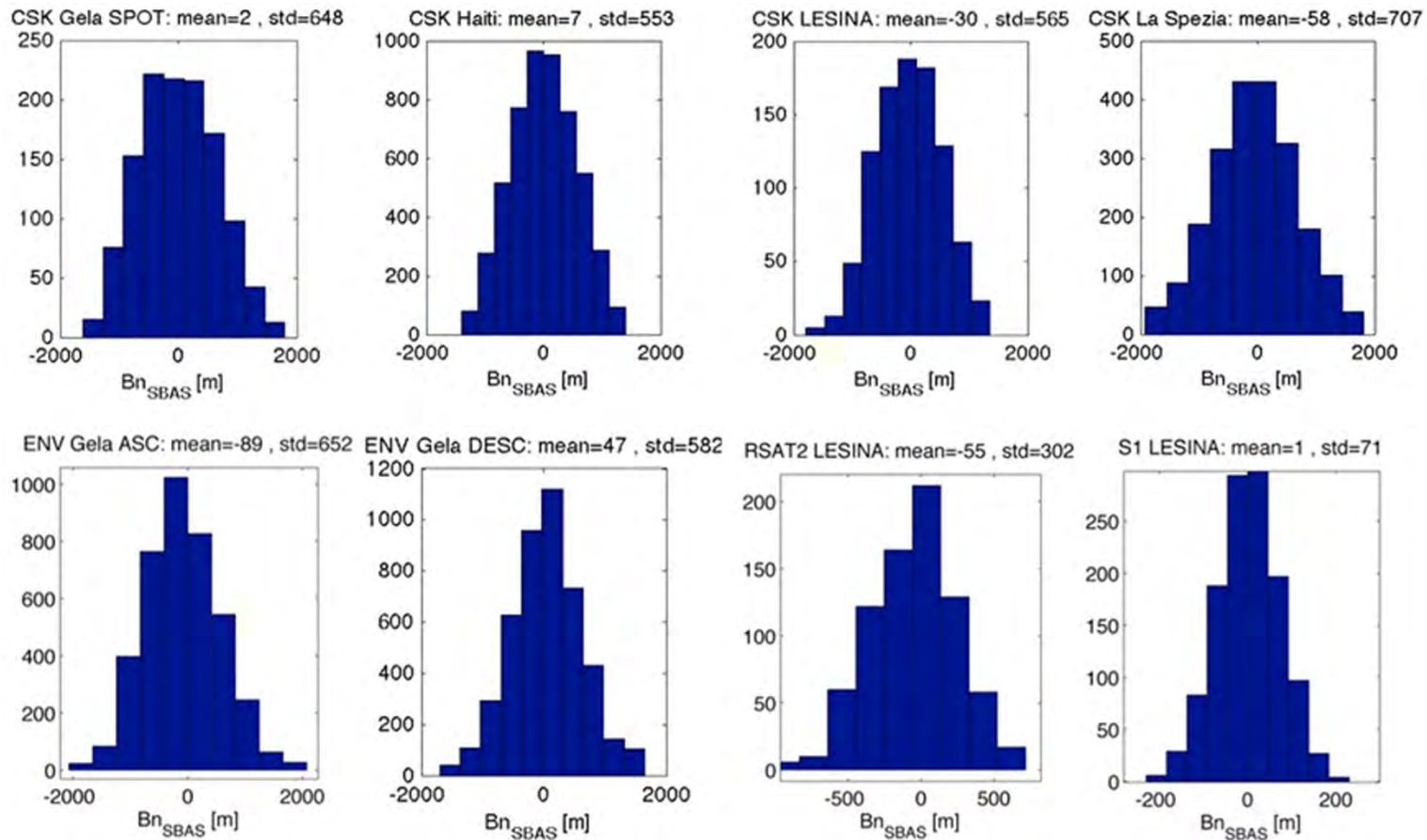
Satellite mission	Wave-length (cm)	Life status	Resolution Az./Range (m)	Repeat Cycle (days)	Swath width (km)	Max. Vel. (cm/yr)	Incident Angle (degree)	Satellite mission	Wave-length (cm)	Life status	Resolution Az./Range (m)	Repeat Cycle (days)	Swath width (km)	Max. Vel. (cm/yr)	Incident Angle (degree)
C-band								L-band							
ERS-1/2	5.6	1992+2001	≈ 6 / 24	35	100	14.6	23	J-ERS	23.5	1992+1998	18	44	75	48.7	35
ENVISAT	5.6	2003+2010	≈ 6 / 24	35	100	14.6	19+44	ALOS PALSAR	23.6	2006+2011	≈ 5 / 7+88	46	40+70	46.8	8+60
RADARSAT-1	5.5	1995+	≈ 8+30	24	45 (fine) 100 (Strip) 200 (Scan)	20.4	20+50	ALOS PALSAR-2	22.9	2014+2019	1/3 3+10/3+10 100/100	14	25 (Spot) 50+70 (Strip) 350 (Scan)	149.2	8+70
RADARSAT-2	5.5	2007+	≈ 3 / 3 ≈ 8 / 8 ≈ 26 / 25	24	10 (Spot) 40 (Strip) 200 (Scan)	20.4	20+50	SAOCOM (2 Sat)	23.5	2015+2021	10+50	8, 16	20+150	268	20+50
Sentinel-1	5.6	2014-2024	20+5	6, 12	250	85	30+46	X-band							
RADARSAT Constellation Mission (3 Sat)	5.5	2018-2026	5+50	3, 12	30+350	163,2	20+55	COSMO-SkyMED (4 Sat)	3.1	2007+2014	≈ 2.5 / 2.5 1.0 / 1.0	2,4,8,16	10 (Spot) 40 (Strip) 200 (Scan)	17.7 35.4 70.7 141.4	20+60
								TerraSAR-X	3.1	2007+2018	≈ 3.3 / 2.8 1.0 / 1.0	11	10 (Spot) 30 (Strip) 100 (Scan)	25.7	20+55
								KOMPSAT-5	3.2	2013-2018	3 / 3 1 / 1	28	5 (Spot) 30 (Strip)	10.4	20+45
								COSMO-SkyMED-2 (2 Sat)	3.1	2016	1+3		10+40		
								TerraSAR-X-NG (constel. with PAZ)	3.1	2016	0.25+30	11	5+20 (Spot) 10+24 (Strip) 50+400 (TOPS)	25.7	20+50
								PAZ (constel. with TerraSAR-X)	3.1	2015+2020	1x1+6x18	11	10 (Spot) 30 (Strip) 100 (Scan)	25.7	20+50

# Dipendenza dalla baseline

$$\gamma \propto \left(1 - \frac{D_{orb}}{D_{cric}}\right) ; \quad \sigma_H \propto \frac{\lambda \cdot \sin(\vartheta)}{N \cdot RMS(D_{orb})}$$

Missione SAR	Acronimo	D <sub>orb</sub> RMS (m)
ENVISAT-ASAR	ENV	1000
RADARSAT-2	RSAT2	2000
Cosmo-SkyMed	CSK	2000
<b>Sentinel-1</b>	<b>S1</b>	<b>100</b>
ALOS PALSAR-2	ALOS2	1000

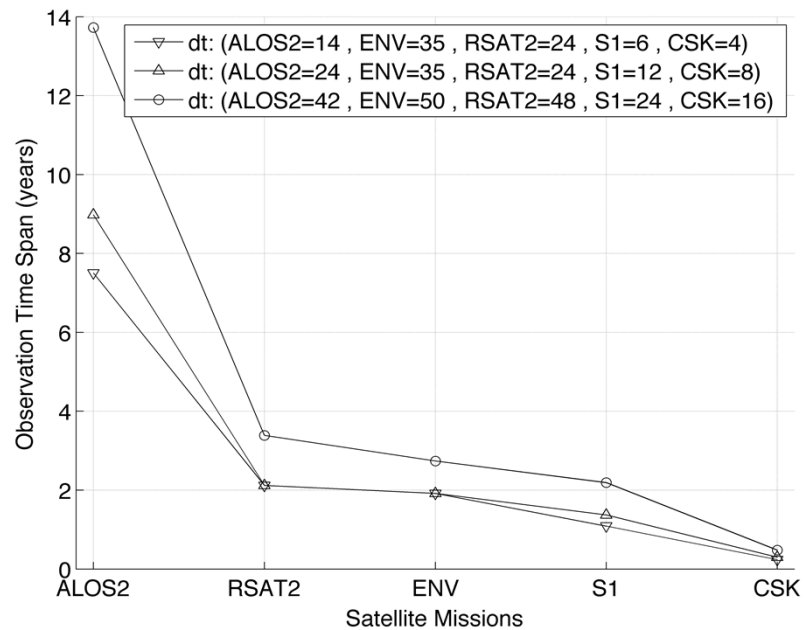
# Distribuzione baseline



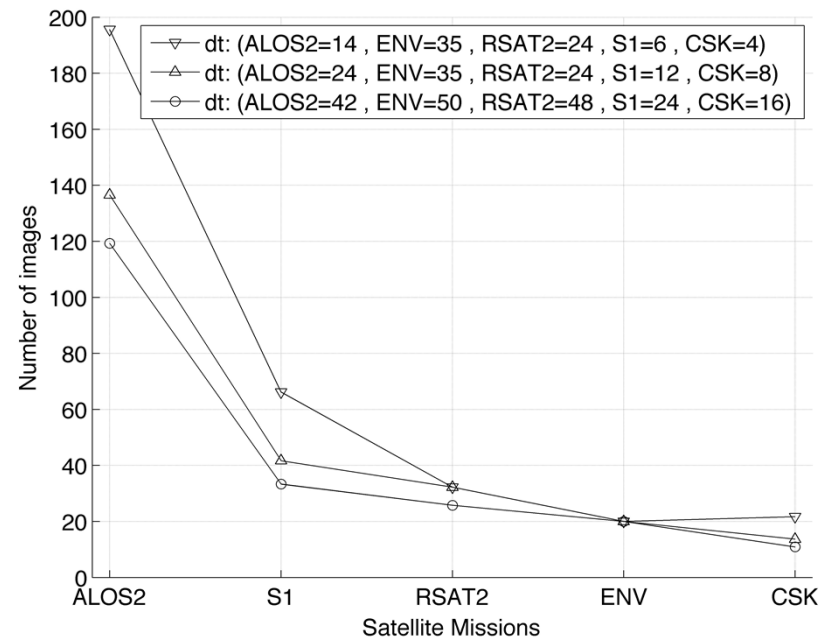


# Performance of C/X band MTI

Observation Time Spans providing the same STD(Vel). ( $N_{ENV}=20$ , T variable)



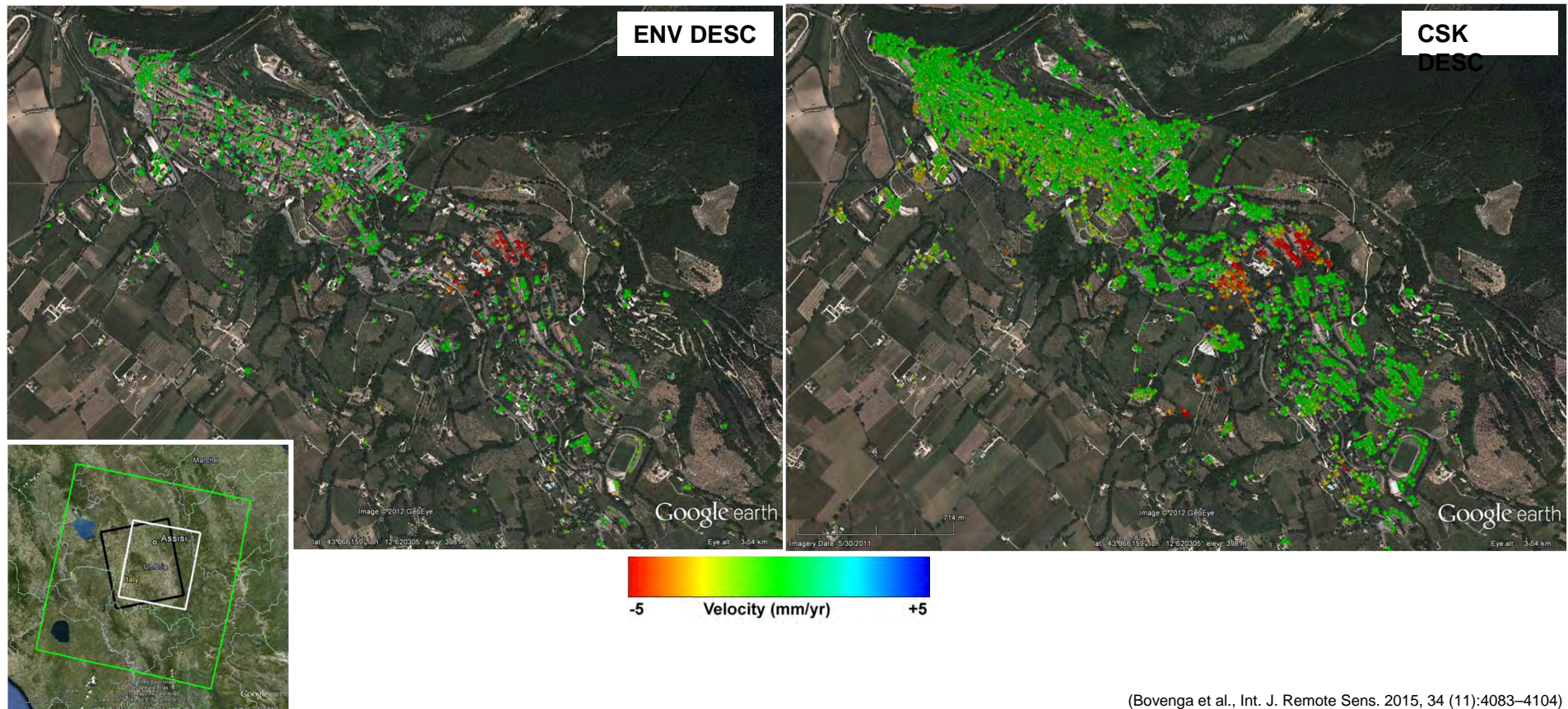
Number of images providing the same STD(Vel). ( $N_{ENV}=20$ , T variable)



- ✓ Buone stime di spostamento ottenibili in tempi minori usando sistemi in X-band: tuttavia la costellazione Sentinel-1 migliorerà i risultati sin'ora ottenuti C-band.

# Assisi test case (Italy)

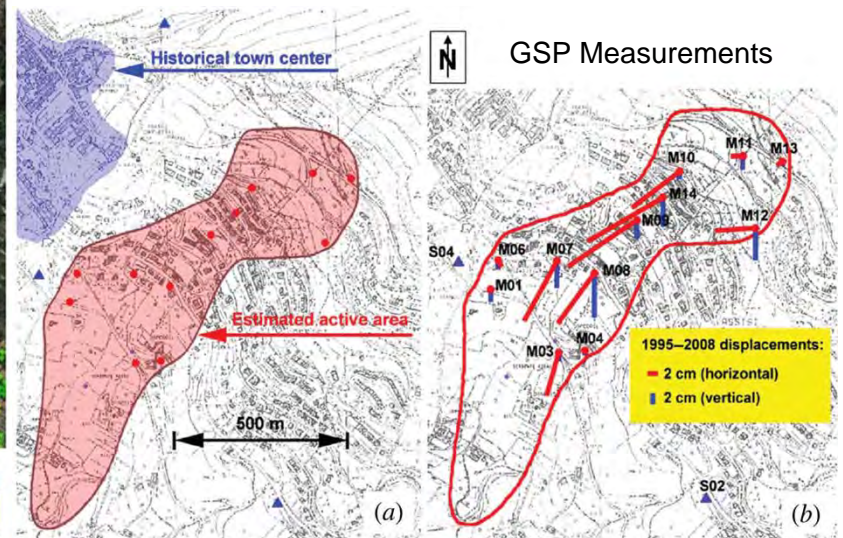
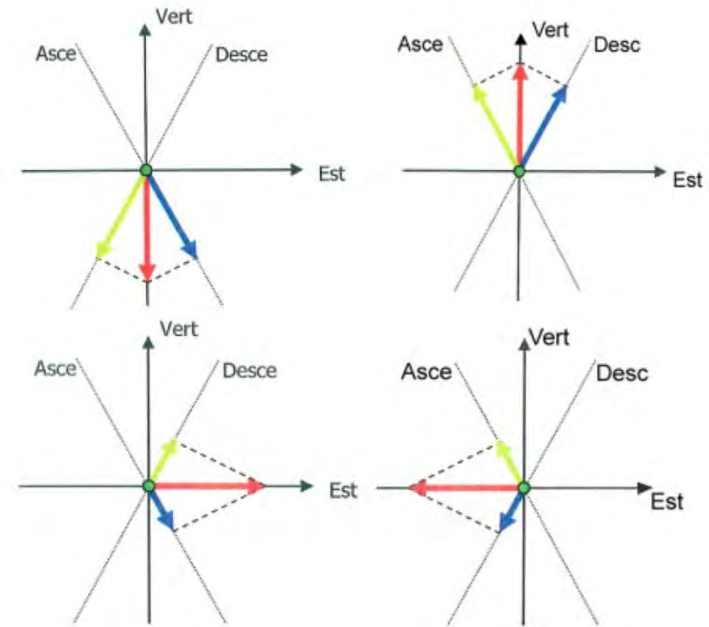
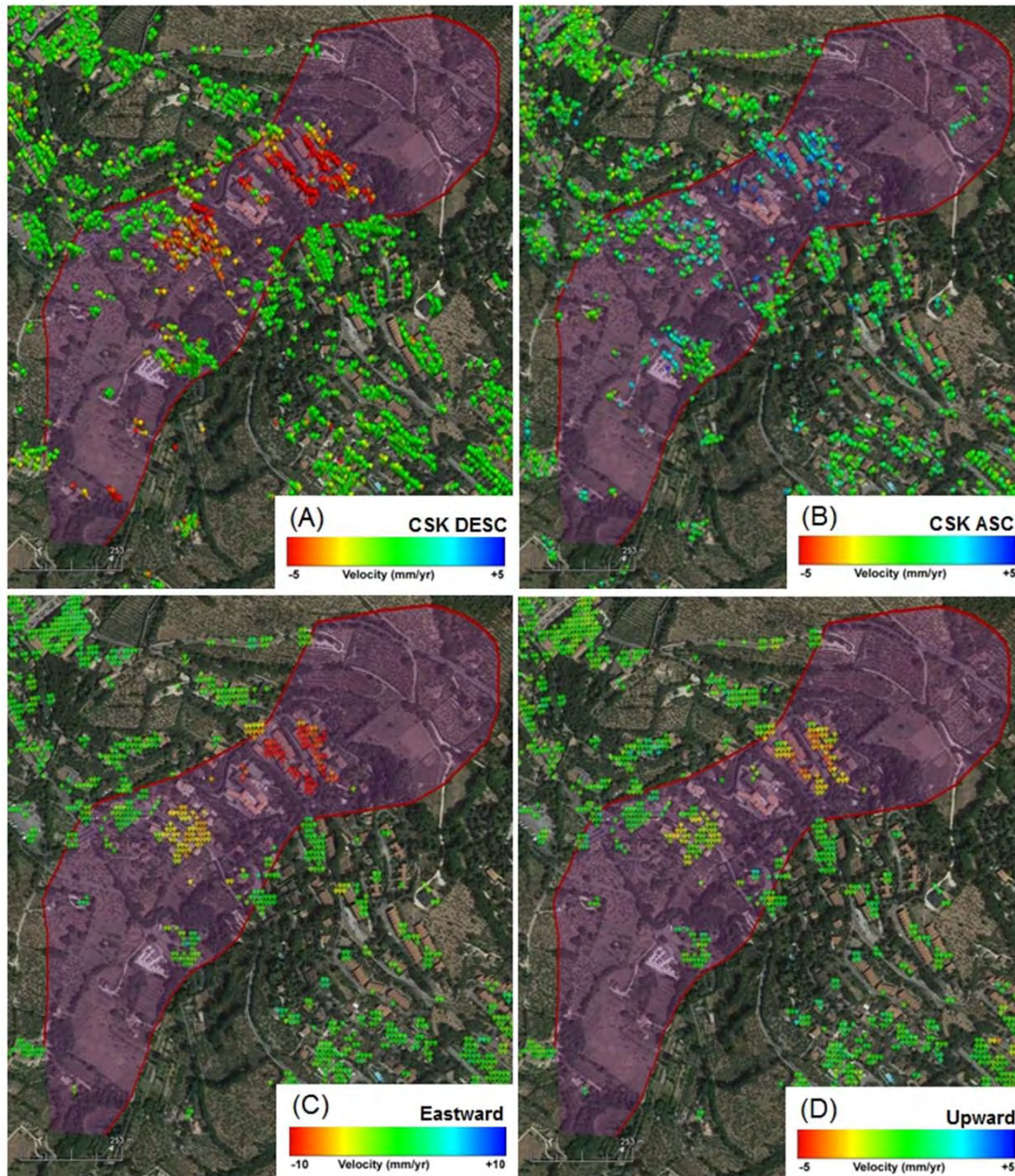
Sensor	Radar Band $\lambda$ (cm)	Passing mode	Imaging mode	POL	Beam	Incidence Angle	Ground Res. Range (m) x Azimuth (m)	N	Time Interval [t <sub>1</sub> , t <sub>2</sub> ]	Spatial density (PS/km <sup>2</sup> ) (AOI: 1.7 x 3.2 km <sup>2</sup> )
ASAR	C band 5.6	Descending	Image Mode	VV	IS2	22.8°	24 x 5	39	[Oct. 2003, May 2010]	312
CSK	X band 3.12	Descending	HIMAGE	HH	03	29.3°	3 x 3	17	[March 2009, Oct. 2010]	3680
CSK	X band 3.12	Ascending	HIMAGE	HH	01	26.6°	3 x 3	20	[May 2009, Sept. 2010]	1800



(Bovenga et al., Int. J. Remote Sens. 2015, 34 (11):4083–4104)



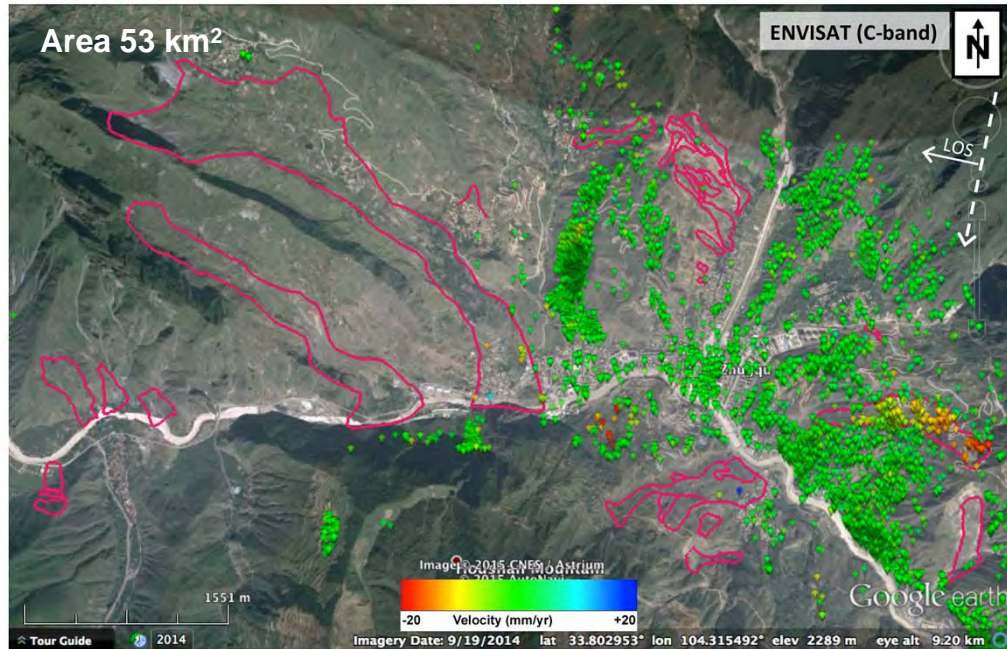
# Assisi test case (Italy)



(Bovenga et al., Int. J. Remote Sens. 2015, 34 (11):4083–4104)

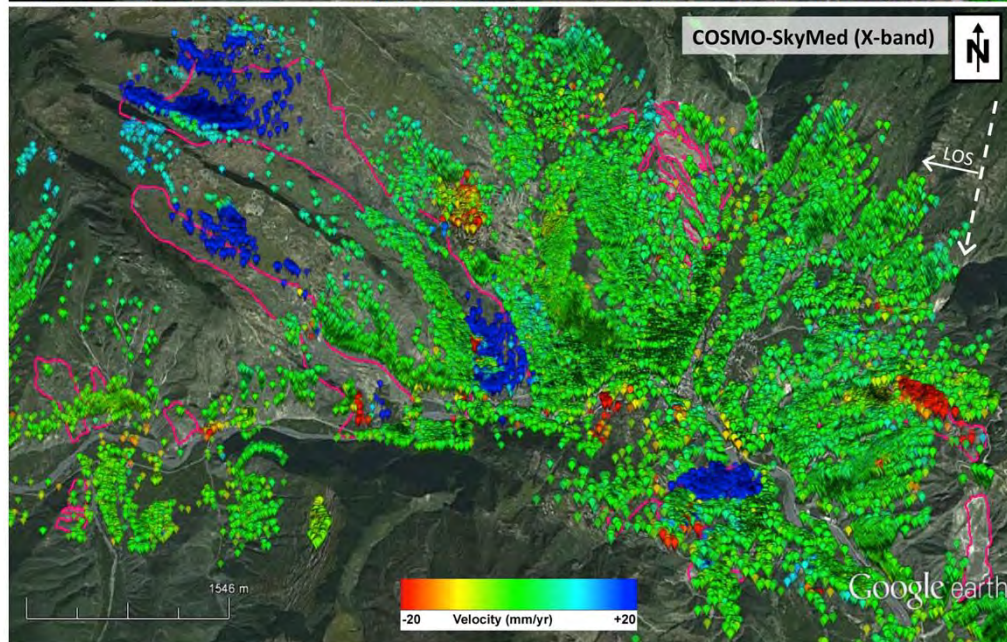


# Zhouqu test case (Gansù, Cina)



## ENV

orbit\_env = desc  
 look\_env = 23°  
 Nimg\_env = 32  
 dT = [07/2003, 08/2010] = 7 y  
 Coh > 0.75  
 $N_{PS} = 5700 \sim 108 \text{ PS/km}^2$   
 $\langle \text{std\_vel} \rangle = 0.26 \text{ mm/y}$



## CSK

orbit\_csk = desc  
 look\_csk = 40°  
 Nimg\_csk = 23  
 dT = [11/2010, 02/2012] = 1.3 y  
 Coh > 0.85  
 $N_{PS} = 77000 \sim 1450 \text{ PS/km}^2$   
 $\langle \text{std\_vel} \rangle = 0.63 \text{ mm/y}$



(Wasowski and Bovenga, 2013, Eng. Geol. 2013, 174:103–138)

# Appennino Dauno

- ✓ Attività iniziata nel 2006: Convenzione AdB-Puglia – ISSIA Studio dei siti in frana nel subappennino Dauno e Capitanata tramite interferometria radar multitemporale ; confronto con dati in situ
- ✓ Analisi serie storiche ERS1/2 ed Envisat;
- ✓ Confronto con dati in Banda X a maggiore risoluzione spaziale;
- ✓ Confronto con i nuovi dati Sentinel1/2
  
- ✓ PS in corrispondenza di strutture urbane e strutture viarie





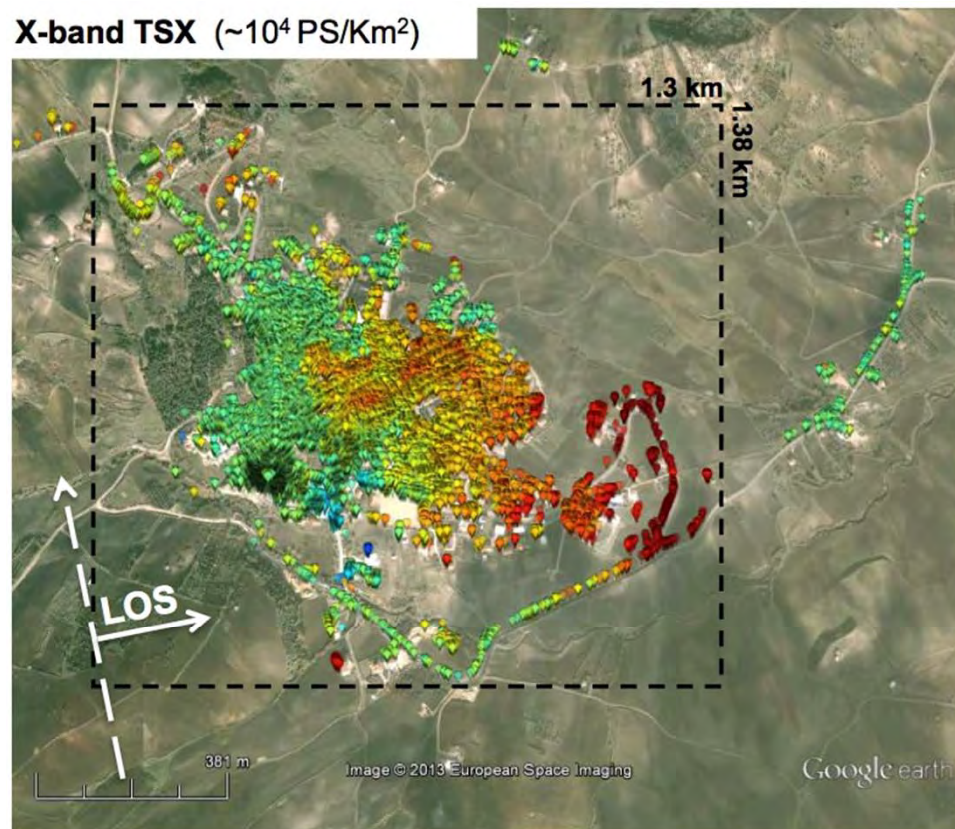
# Appennino Dauno

- ✓ L'alta risoluzione spaziale porta ad un sensibile aumento nel numero di PS (con un fattore da 10 a 40)

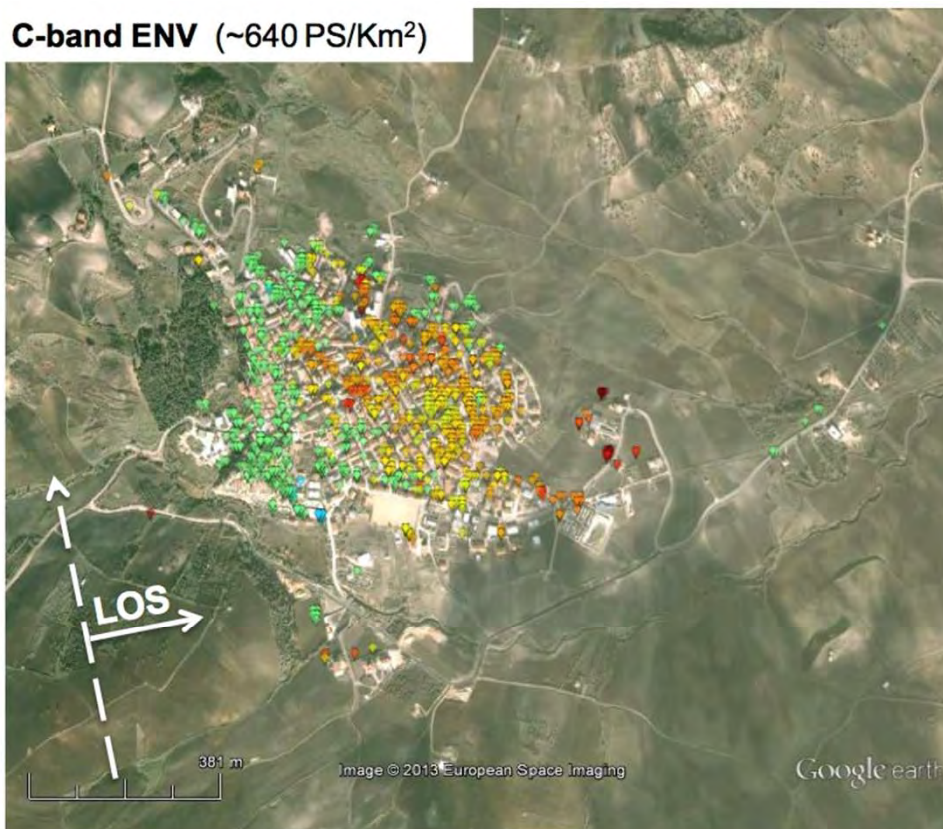
Site	#PS (C Band)	#PS (X Band)	#PS (X Band)/ #PS (C Band)
Alberona	573	6233	10.9
Carlantino	529	6996	13.2
Casalnuovo Monterotaro	1062	14,829	14.0
Casalvecchio di Puglia	1154	14,767	12,8
Castelnuovo della Daunia	1187	15,364	12.9
Celenza Valfortore	504	7942	15.8
Motta Montecorvino	542	8074	14.9
Pietra Montecorvino	1140	18,398	16.1
San Marco la Catola	182	7605	41.8
Volturara Appula	335	4959	14.8
Volturino	1269	16,103	12.7

# Pietramontecorvino: TerraSAR-X vs ENV

X-band TSX ( $\sim 10^4$  PS/Km<sup>2</sup>)



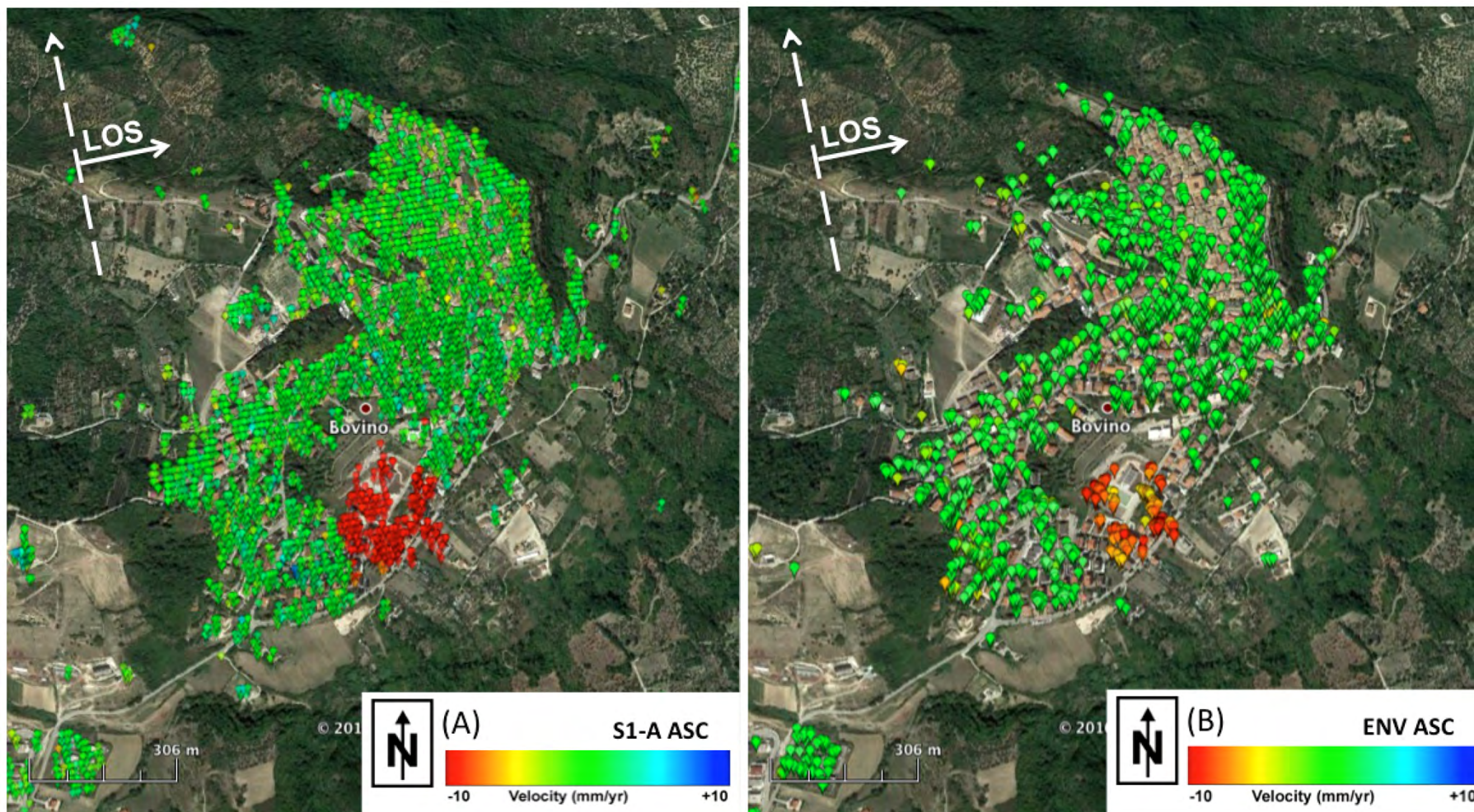
C-band ENV ( $\sim 640$  PS/Km<sup>2</sup>)



(Wasowski and Bovenga, 2015, Landslide Hazards, 345-403)



# Bovino: Sentinel-1 vs ENV



Mission	Mode	Res. GR/Az (m)	Inc. ang.	$N_i$	T mm.yyyy
ENV	Strip Asc.	20 / 5	23°	47	[10.2002,01.2011]
S1	Strip Asc.	5 / 20	34°	69	[10.2014, 11.2016]



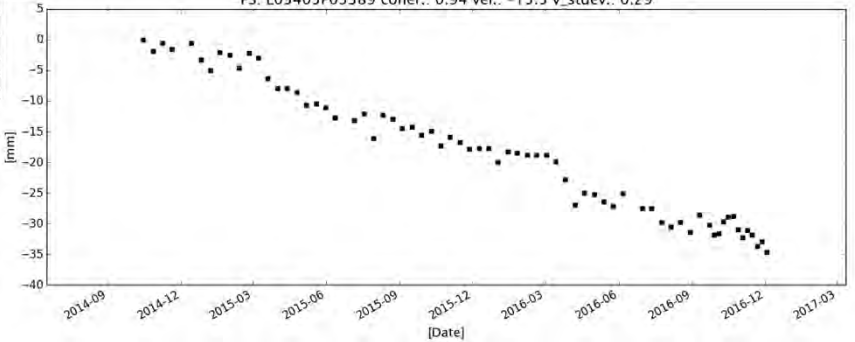
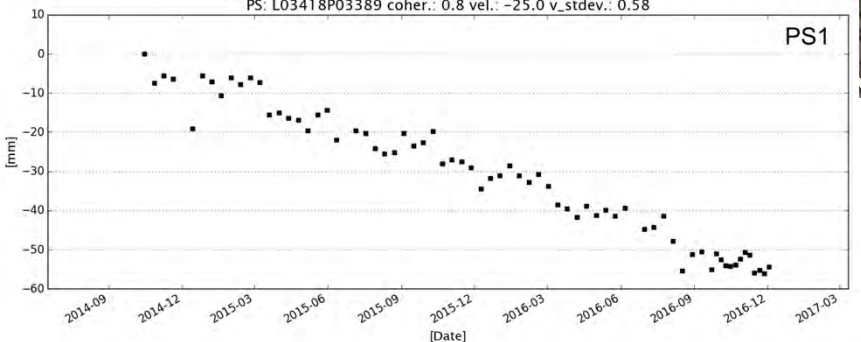
# Bovino: Sentinel-1



PS: L03418P03389 coher.: 0.8 vel.: -25.0 v\_stdev.: 0.58

© 2016 Google

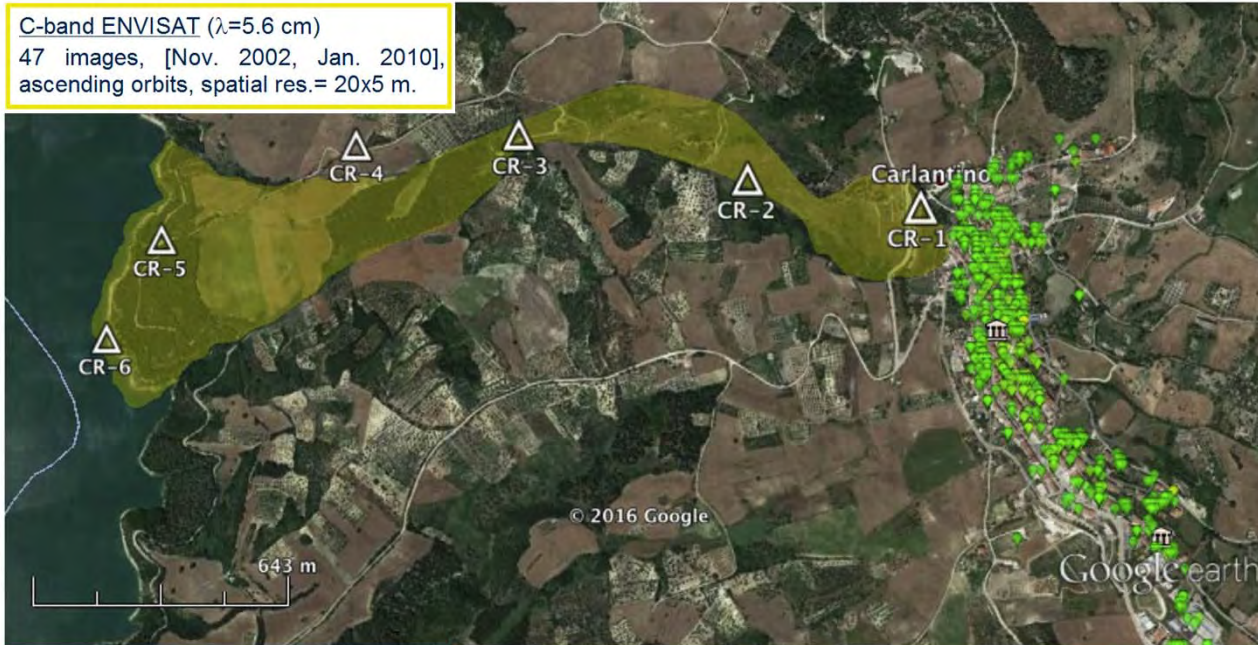
PS: L03405P03389 coher.: 0.94 vel.: -15.5 v\_stdev.: 0.29



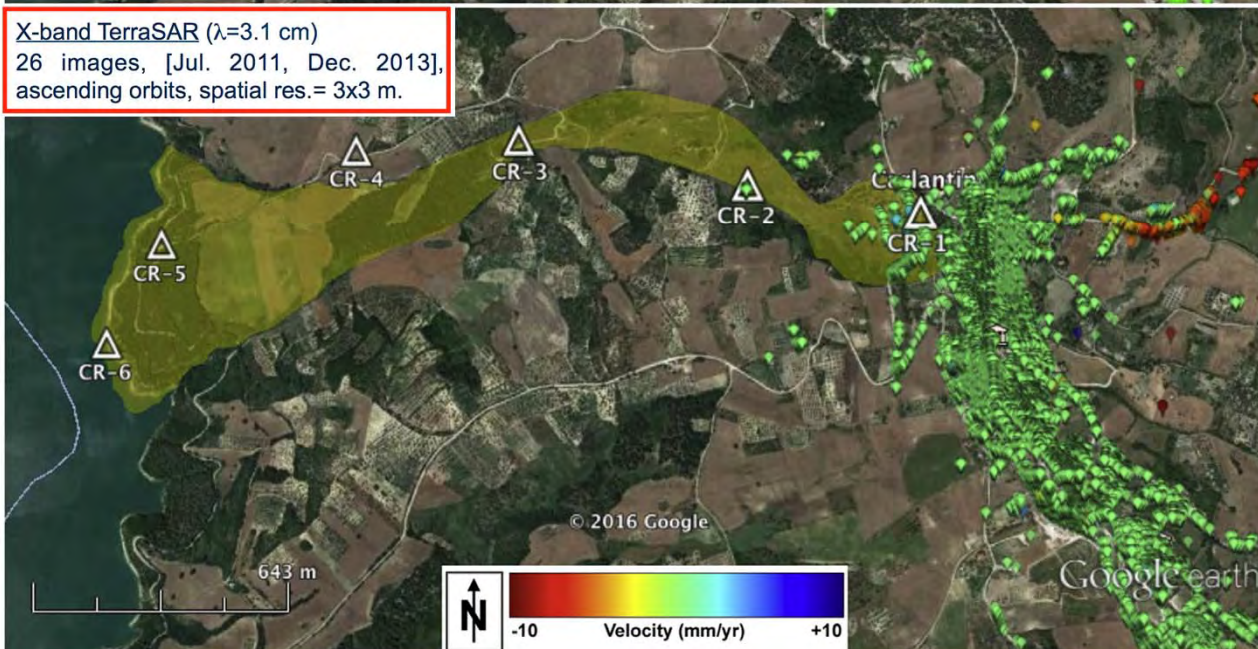


# Uso di scatteratori artificiali: frana di Carlantino

C-band ENVISAT ( $\lambda=5.6$  cm)  
47 images, [Nov. 2002, Jan. 2010],  
ascending orbits, spatial res.= 20x5 m.

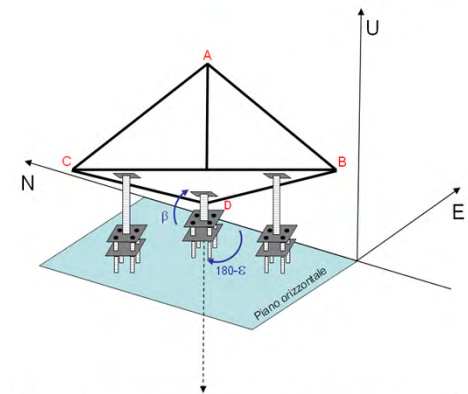


X-band TerraSAR ( $\lambda=3.1$  cm)  
26 images, [Jul. 2011, Dec. 2013],  
ascending orbits, spatial res.= 3x3 m.



La zona in frana di Carlantino caratterizzata dalla mancanza di target radar naturali coerenti, per la vegetazione e campi coltivati.

Usati piccoli e poco costosi Small Corner Reflectors



(Bovenga et al., 2017, Catena, 151: 49-62)

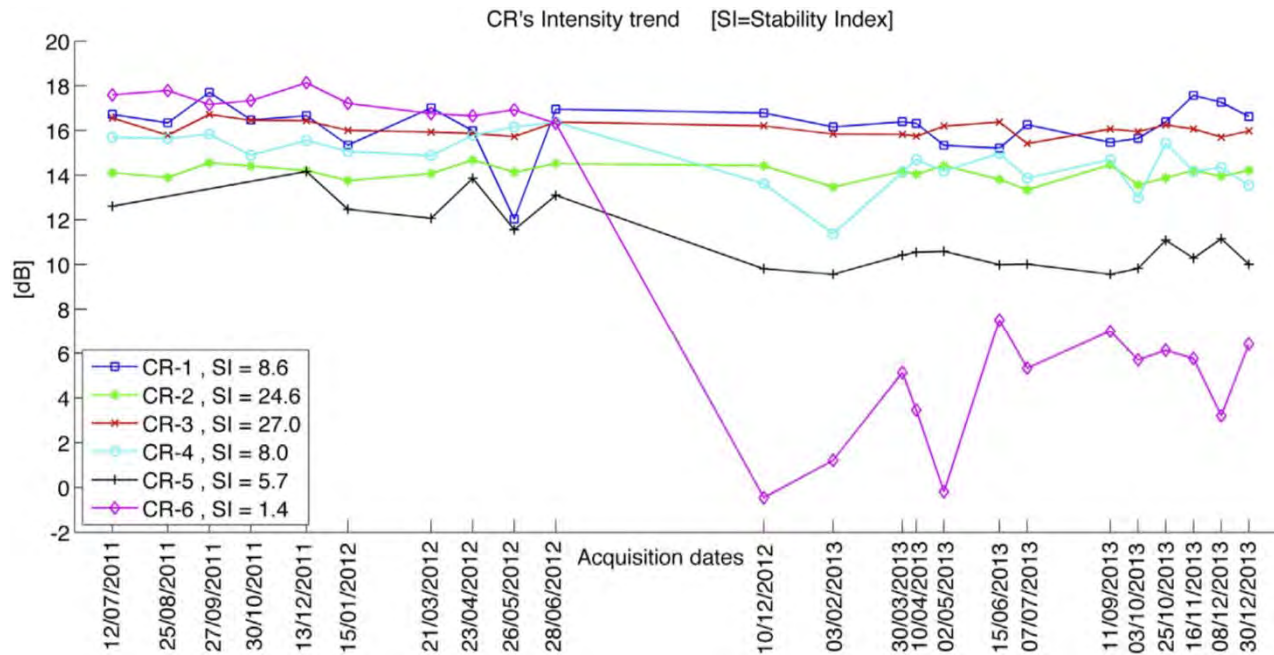


# Posa in opera dei CR

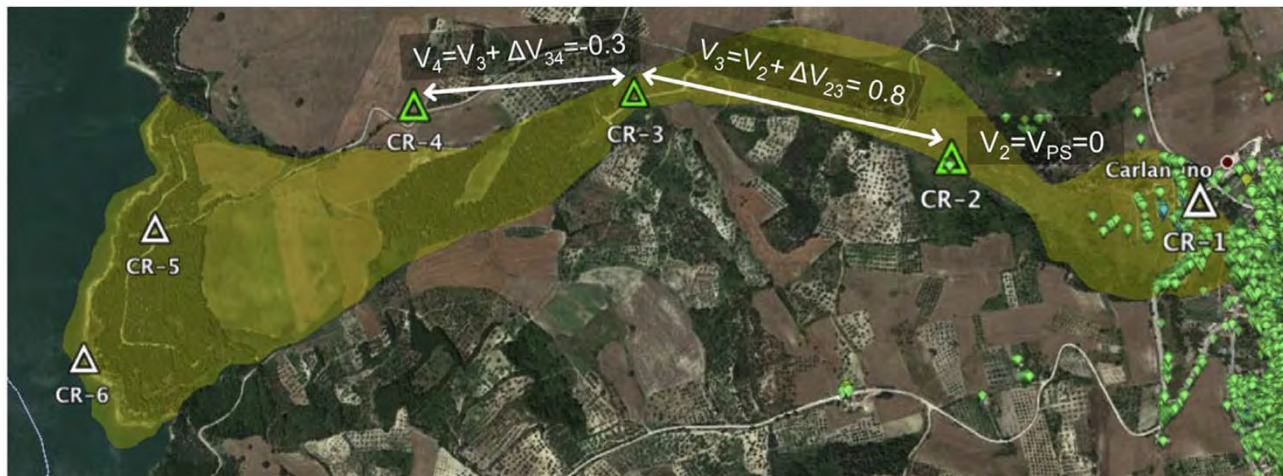




# Carlantino: analisi dei CR



2 CR su 6 soggetti ad atti vandalici. Tuttavia i rimanenti 4 utili a testimoniare la stabilità dei punti come conferma dei lavori di consolidamento.



(Bovenga et al., 2017, Catena, 151: 49-62)

- ✓ Marina di Andora è un caso interessante per stabilire il ruolo che le tecniche MTI possono avere per la valutazione del rischio
- ✓ Analisi retrospettiva per verificare se c'erano stati segnali precursori dell'evento verificatosi nel Gennaio 2014
- ✓ **CosmoSKYMed**: Strip., Asc., N=55, [Oct.2008, May.2014]

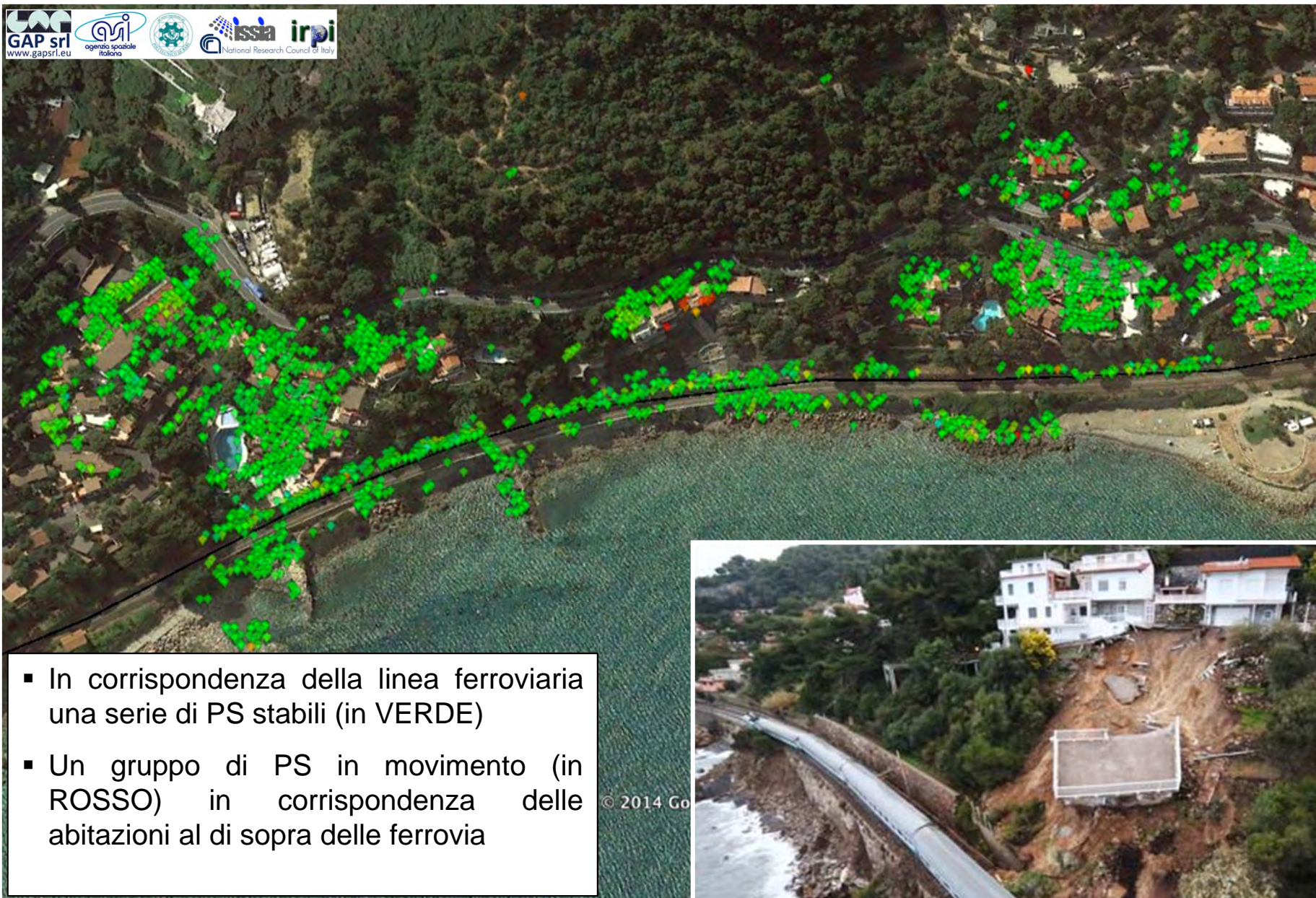
## Marina di Andora test case



Nel gennaio 2014 nei pressi di Marina di Andora, il crollo di un terrazzo di una villetta provocò il deragliamento di un treno sulla linea Genova-Ventimiglia e la conseguente interruzione dei collegamenti ferroviari con la Francia.



# Marina di Andora test case



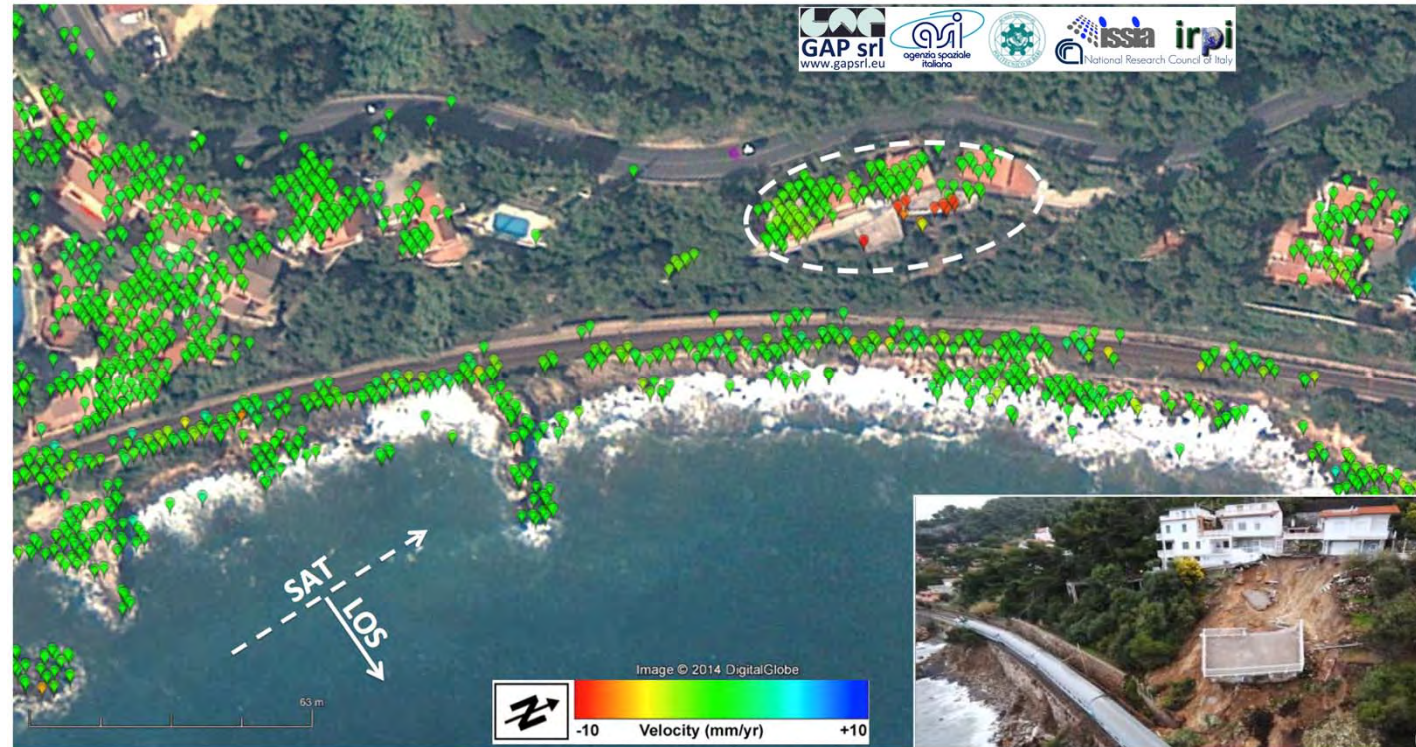
- In corrispondenza della linea ferroviaria una serie di PS stabili (in VERDE)
- Un gruppo di PS in movimento (in ROSSO) in corrispondenza delle abitazioni al di sopra delle ferrovie

(Nutricato et al., 2015, Proc. IGARSS 2015, 1405-1408)

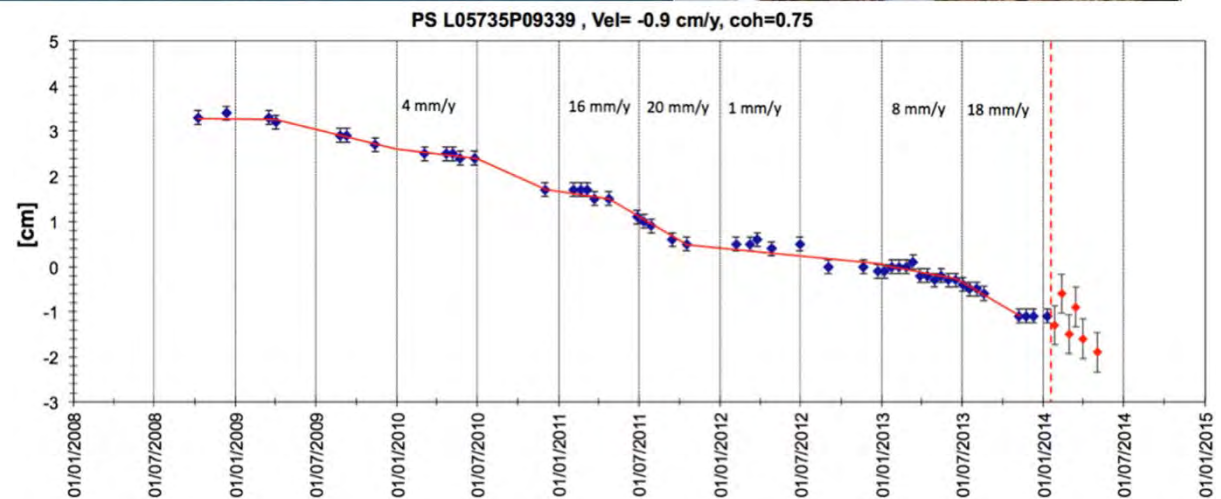


# Marina di Andora test case

- L'analisi dei profili temporali dei PS in movimento dimostra che i movimenti erano iniziati dal 2009 (segnali precursori)
- Risultato possibile per l'alta risoluzione spaziale e temporale della costellazione CSK



- Condizione favorevole per l'orientazione del versante;
- Interpretazione «a posteriori» facilitata



(Nutricato et al., 2015, Proc. IGARSS 2015, 1405-1408)

## Final Comments

- ✓ Con la “vecchia generazione” di satelliti in C-band ERS, ENVISAT, RADARSAT-1 il monitoraggio delle frane abbastanza problematico (applicabile al  $\approx 10\%$  dei casi );
- ✓ Nel monitoraggio delle frane gioca un ruolo fondamentale la risoluzione spaziale e quella temporale (tempo di rivisita) oltre che la completezza della serie ;
- ✓ La nuova generazione di sensori X-band ad alta risoluzione spaziale assicura una densità elevata di PS; le future costellazioni uniranno l’alta risoluzione spaziale a quella temporale;
- ✓ La nuova costellazione in C-Band delle Sentinel-1A/B assicura un sufficientemente breve tempo di rivisita , e la sicurezza di serie temporali dense e con bassa variabilità delle baseline oltre che l’accesso gratuito ai dati;
- ✓ Di fronte alla grande quantità di dati di serie temporali di spostamento che saranno forniti dalla tecnica Sar Interferometrica Multi Temporale, la sfida tecnologia si sposta sulla capacità di sintetizzare ed analizzare questi dati. In questo è fondamentale la conoscenza a priori del fenomeno osservato

# E' tutto!

## Acknowledgments

Attività svolte da A. Belmonte<sup>a</sup>, F. Bovenga<sup>a</sup>, G. Pasquariello<sup>a</sup>, A. Refice<sup>a</sup>, D.O. Nitti<sup>b</sup>, R. Nutricato<sup>b</sup>, MT Chiaradia<sup>c</sup>, L. Guerriero<sup>c</sup>, J. Wasonsky<sup>d</sup>, R. Pellicani<sup>e</sup>, G. Spilotro<sup>e</sup>

<sup>a</sup> CNR ISSIA, Bari

<sup>b</sup> Geophysical Applications Processing s.r.l.,

<sup>c</sup> Politecnico di Bari

<sup>d</sup> CNR IRPI, UoS Bari

<sup>e</sup> Università della Basilicata, Matera,

- Work supported by: **Convenzione AdB-Puglia – ISSIA** Studio dei fenomeni di subsidenza nel subappennino Dauno e Capitanata tramite interferometria radar multitemporale (2006); **PRIN2008** METODOLOGIE AVANZATE NELLA VALUTAZIONE E MITIGAZIONE DEL RISCHIO DA FRANA, “**APULIA SPACE**” (PON03PE\_00067\_6), PON Ricerca e competitività 2013-2016.
- The CSK imagery for the Zhouqu site, China was provided by the ASI within the COSMO-SkyMed AO Project ID 1820. ENVISAT and CSK data for Assisi (Italy) were provided respectively by the European Space Agency (ESA) and ASI in the framework of the MORFEO project funded by ASI (Contract no. I/045/07/0).
- Marina di Andora results were obtained in the framework of projects “CAR-SLIDE - Mapping and monitoring system for landslides forecast” (PON R&C 2007-2013) and “ADF - Archiving Data Fusion” CSK products processed under a license of ASI “Original COSMO-SkyMed Product - Agenzia Spaziale Italiana - (2013-2014). All rights reserved”.