

# CONFRONTO TRA MISURE TRADIZIONALI E TECNICA SATELLITARE SU UNA DIGA IN TERRA ED UNA IN CALCESTRUZZO

## COMPARISON BETWEEN TRADITIONAL MEASUREMENTS AND SATELLITE TECHNIQUE ON AN EARTH DAM AND ON A CONCRETE DAM

F.Giancola

Sapienza Università degli Studi di Roma - D.I.C.E.A, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Via Eudossiana, 18, 00184 Roma

**PAROLE CHIAVE:** Monitoraggio dighe, SAR, COSMO-SkyMed, spostamenti verticali, livellazione

**KEY WORDS:** Dams monitoring, SAR, COSMO-SkyMed, vertical displacements, levelling

### RIASSUNTO

Il miglioramento dei metodi per il monitoraggio delle dighe rappresenta un problema crescente tra la comunità che si occupa della sicurezza delle infrastrutture critiche. Sebbene i cedimenti strutturali nelle dighe sono solitamente improvvisi, nella maggior parte dei casi è possibile capire in anticipo quando i danni strutturali potrebbero evolvere in un processo pericoloso. Al giorno d'oggi, lo sviluppo di metodologie innovative per la modellazione strutturale statica e dinamica permette di migliorare notevolmente la capacità di prevedere crolli, ed in tal modo prevenire e ridurre i rischi associati. Per quanto riguarda questo problema, diverse tecniche geomatiche possono essere proficuamente sfruttate per la realizzazione di modelli analitici e matematici. Questo si ottiene beneficiando della disponibilità di misure di spostamento dense e precise, fornite sia dai dati satellitari sia dai sensori terrestri aventi elevate coperture temporali e spaziali. Per quanto riguarda le tecnologie satellitari, i vantaggi consistono nel rilevamento accurato di spostamenti del suolo sull'intera infrastruttura senza necessità di installare localmente punti di controllo. La disponibilità di misure di deformazione spazialmente dense è di importanza cruciale per la modellazione strutturale perché ciò permette di superare gli inconvenienti dei sistemi di controllo tradizionali, che prevedono misure di alta precisione solo su un numero limitato di punti.

Lo scopo di questo lavoro è quello di mostrare i risultati su due casi di studio: la diga in terra di Genzano di Lucania (PZ) e la diga a gravità di Corbara (TR). In particolare, si mostra come misurazioni satellitari possono essere proficuamente sfruttate ed efficacemente integrate con le misure tradizionali, al fine di migliorare le attuali sistemi di monitoraggio e di aumentare la sicurezza delle dighe.

### ABSTRACT

The improvement of the methods for dam deformation monitoring represents a growing issue among the community that deals with the safety of critical infrastructures. Although dam failures are usually sudden, in the majority of cases it is possible to understand in advance when structural damage conditions might evolve in a dangerous process. Nowadays, the development of innovative methodologies for the static and dynamic structural modeling allows to sharply improve the capability of predicting collapses, thus preventing and reducing the associated risks. With respect to this issue, several geomatic techniques can be profitably exploited for the implementation of analytical and mathematical models. This is accomplished by benefiting from the availability of dense and accurate displacement measurements provided both by satellite data and ground sensors having high temporal and spatial coverages. As for satellite-based technologies, the improved capability relies on the detection of accurate ground displacements on the whole infrastructure with no need to install locally control points. The availability of spatially dense deformation measurements is of crucial importance for structural modeling because it allows us to overcome the drawbacks of traditional monitoring systems, which provide high accuracy measurements only on a limited number of points. The aim of this work is to show the results on two case studies: the Genzano di Lucania earth dam (PZ) and at Corbara gravity dam (TR) relevant to the monitoring of the dams. In particular, we show how satellite measurements can be profitably exploited and effectively integrated with the traditional measurements, in order to improve the current monitoring systems and increase the safety of dams.

### 1. INTRODUZIONE

Nel panorama italiano le oltre 500 grandi dighe (per lo più realizzate negli anni 1950-1960) costituiscono un grande patrimonio infrastrutturale che richiede interventi di ripristino, miglioramento, adeguamento, controllo delle condizioni di sicurezza e di funzionalità. L'esigenza di tali interventi può essere ricondotta ad "invecchiamento" delle opere, a mutate condizioni sulle conoscenze degli eventi sismici ed idrologici,

cui possono associarsi modifiche della regolazione del serbatoio con variazione del volume di invaso e dell'altezza della diga. Il grande progresso compiuto negli anni recenti dagli strumenti di monitoraggio e dai sistemi di trasmissione ed elaborazione dei dati, per quanto attiene all'affidabilità e precisione delle misure ed alla velocità di acquisizione, registrazione, confronto, valutazione e trasferimento a grandi distanze dalle osservazioni,

rende necessario il riesame, non soltanto dei metodi attuali di controllo delle dighe, ma anche dell'intera filosofia di controllo, al fine di utilizzare pienamente il progresso tecnologico per la riduzione del grado di rischio delle dighe già in esercizio, come quelle di futura costruzione.

Le tecniche topografiche classiche soffrono di due inconvenienti : l'impossibilità di fornire informazioni complete riguardo la deformazione e la difficoltà di effettuare la misura, tutte le volte che è necessario, nelle zone difficilmente accessibili. Nuove tecnologie superano questi inconvenienti, permettendo un complesso e continuo controllo del movimento strutturale attraverso satellite o sensori terrestri, senza necessità di accedere alla struttura.

Come di seguito presentato, la tecnologia di interferometria satellitare SAR è stata utilizzata per il monitoraggio della di Genzano di Lucania, situata in Basilicata, e della diga di Corbara in Umbria.

## 2. TEST SITE 1 : GENZANO

### 2.1 Diga di Genzano

L'opera di sbarramento è costituita da una diga in terra con nucleo centrale impermeabile, rinfianchi di monte e di valle in materiale sciolto. Tra nucleo e rinfianchi sono previsti una zona di transizione a monte e filtri a doppio strato a valle. L'avandiga è realizzata in materiale sciolto con nucleo centrale impermeabile. L'opera è completata dagli scarichi di superficie e di fondo, comprendenti tra l'altro gallerie naturali e artificiali. La diga ha un'altezza di 88m ed uno sviluppo al coronamento di 935m ed è stata costruita tra il luglio 1979 e il gennaio 1993. Durante questo periodo, a causa del terremoto dell'Irpinia (23 novembre 1980) e per il rilascio della nuova legge tecnica italiana (DMLL.PP. 24-03-1982- "Norme tecniche per la progettazione e la costruzione di dighe") una modifica del progetto è stato richiesto (Dicembre 1985) per modificare la geometria della sezione trasversale. Le principali modifiche sono state l'elevazione della cresta da 445 m.s.l.m. a 448,9 m.s.l.m. e l'aumento della larghezza della cresta da 8 a 10 m (E.S.I.T.F.P.L., 1985).

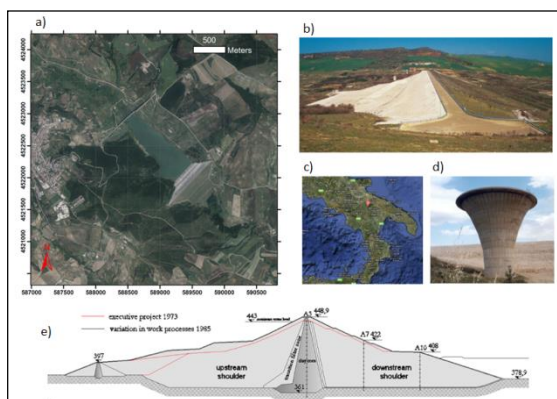


Figura 1. Diga di Genzano

### 2.2 Sistema di monitoraggio presente

Il sistema di monitoraggio installato sulla diga include diversi sensori: 51 celle piezometriche a corda vibrante, 18 celle di pressione, 9 piezometri a tubo aperto, e 13 colonne assestometriche modello USBR (US Bureau of Reclamation), di cui 5 si trovano all'interno del nucleo e 8 all'interno del contronucleo a valle (Figura 2). Il livello di invaso, le precipitazioni e la temperatura dell'aria e dell'acqua sono registrate attraverso appositi dispositivi.

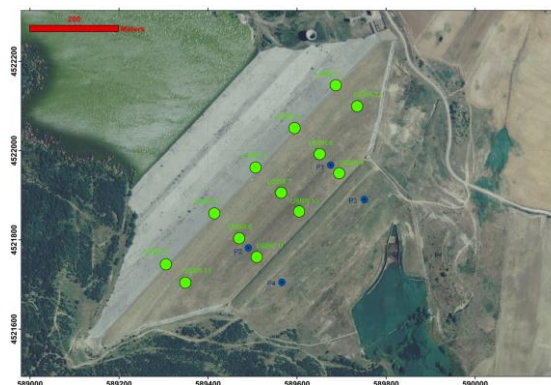


Figura 2. Posizione delle colonne assestometriche (cerchi verdi) e dei piezometri installati sulla diga (cerchi blu)

Il sistema di monitoraggio geodetico consiste in 49 prismi retroriflettenti posizionati sulla struttura per monitorare la deformazione del corpo diga lungo la cresta e sul rinfianco a valle, misurando i prismi con una stazione totale TCA - 2003. Gli stessi prismi vengono utilizzati per effettuare misure di livellazione geometrica ad alta precisione. Le misurazioni sono ripetute ogni tre mesi. I prismi sono disposti sulla diga come indicato:

- 16 sulla cresta della diga (dal 3 al 18)
- 13 al primo gradone (dal 19 al 31)
- 11 al secondo gradone (dal 32 al 42)
- 9 al terzo gradone (dal 43 al 51)

I punti 1 e 2 sono utilizzati come riferimento (Figura 3).

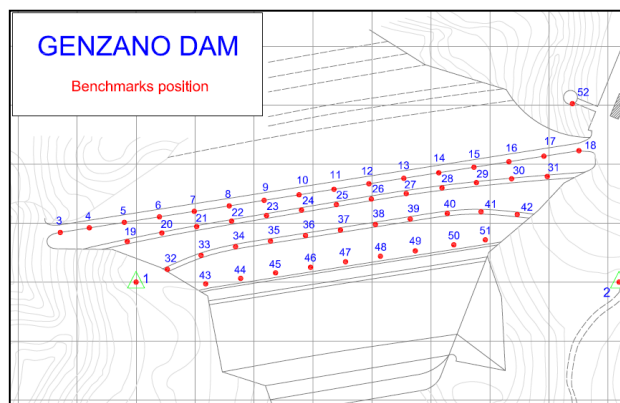


Figura 3. Livellazione: disposizione dei prismi

Questa rete di monitoraggio è stata installata sull'opera nel Luglio 1999, quindi le prime misure disponibili risalgono a tale periodo. L'analisi dei dati di monitoraggio relativi ai vari punti di misura hanno rilevato importanti spostamenti verticali. La figura 6 mostra che lo spostamento massimo cumulato (da luglio 1999 a ottobre 2010) è riscontrato sul primo allineamento (cresta della diga) presso il punto di riferimento 11 con un valore dello spostamento di 180 mm. Il grafico mostra che in tutti gli allineamenti è presente una tendenza alla deformazione, con una velocità media/anno pari a 18 mm per il punto di riferimento 11.

### 2.3 Analisi DInSAR e confronto con misure di livellazione e assestimentriche

Gli output dell'analisi SBAS-DInSAR, effettuata su un dataset di immagini Cosmo-SkyMed e messe a disposizione dall'IREA CNR, sono stati elaborati da parte del DICEA-“Sapienza” in ambiente GIS (Lanari, 2004) (Massonnet, 1998) (Berardino, 2002), in cui sono stati analizzati sia le mappe di velocità annuali sia le serie storiche di deformazione, che descrivono i cedimenti osservati sulla diga di Genzano tra il 1992 e il 2007. La mappa di velocità media annua è disponibile soltanto sulla cresta della diga e sul versante di monte (rivestito con materiale rip-rap). A causa della presenza di vegetazione e la conseguente mancanza di diffusori permanenti coerenti, non è stato possibile analizzare i punti appartenenti al versante di valle. L'analisi di dati DInSAR, effettuata per un periodo di 15 anni (1992-2007), mostra chiaramente la porzione della diga che si sta abbassando (Figura 4), con una velocità media massima di 15,5 mm / anno, come indicato in Tabella 1.

I risultati mostrano che gli spostamenti verticali raggiungono valori massimi di 24 cm per il periodo 1992-2007 lungo la cresta della diga, mentre sono quasi inesistenti al piede della struttura. La Figura 4, quindi, mostra la velocità media di spostamento LOS (proiettata lungo la direzione verticale) per ogni punto di misura ottenuta per la geometria discendente. Le velocità negative rappresentano spostamenti in allontanamento dal satellite (si ipotizza un fenomeno di subsidenza, in quanto spostamenti orizzontali sono rari per queste opere) mentre il colore verde indica le aree stabili.

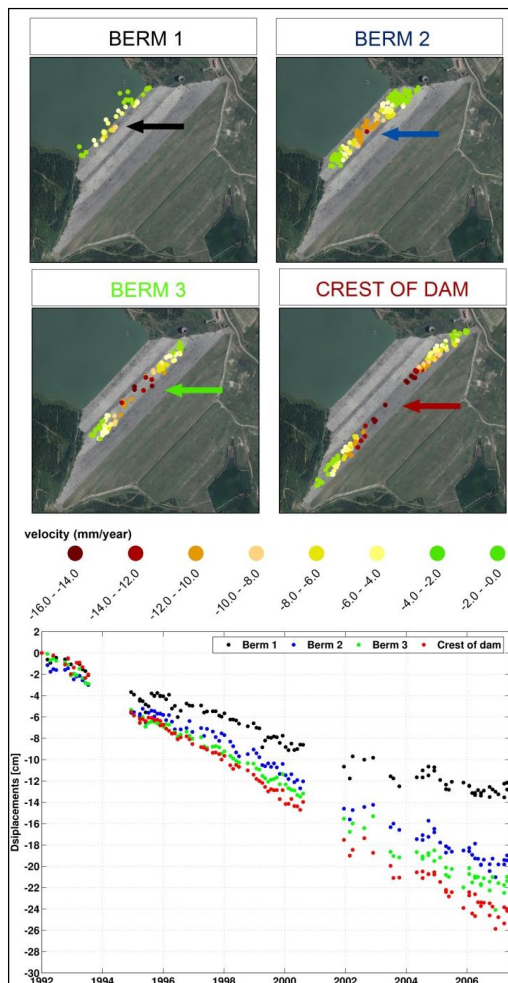


Figura 4. In alto le misure di spostamento DInSAR classificate per velocità media; in basso serie temporali degli spostamenti DInSAR dal 1992 al 2007

Posizione	Velocità media (mm/anno)
Berm 1	8.6
Berm 2	13.3
Berm 3	14.6
Crest of dam	15.5

Tabella 1. Spostamenti SAR

Di seguito si riporta il confronto effettuato tra le misurazioni satellitari e misurazioni effettuate con metodi convenzionali (misurazioni assestimentriche e livellazione). In Figura 5 gli spostamenti misurati con gli assestimetri USBR1, USBR3 e USBR4 nel periodo 1992-2006 sono stati confrontati con le serie storiche dei PS corrispondenti ottenuti dai dati DInSAR. In Tabella 2 vengono inoltre riportati i valori di velocità media annua delle due tecniche.

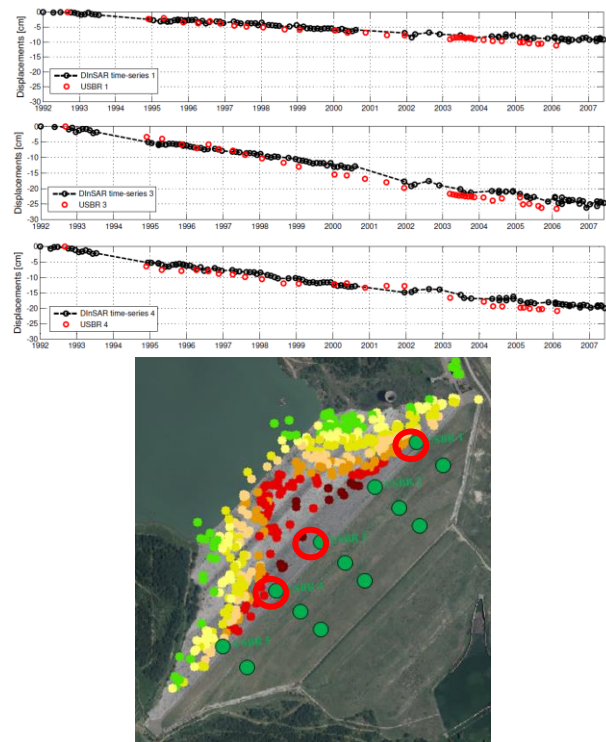


Figura 5. In alto confronto tra serie storiche di spostamento ottenute da: DInSAR (linea nera) e misure assestimentriche in cresta (cerchi rossi); in basso individuazione degli assestimetri e dei PS analizzati e messi a confronto.

Posizione	Velocità media (cm/anno)	
	USBR	SAR
1	0.76	0.66
3	1.64	1.96
4	1.32	1.39

Tabella 2. SAR vs assesti metri

Anche le misure di livellazione sono state confrontate con i dati SAR, come mostrato in Figura 6. Sono stati selezionati tre prismi di livellazione sulla cresta della diga, e confrontati con i

corrispondenti PS (si sono selezionati i punti scatterati inclusi in un intorno di 2m).

A causa della ridotta disponibilità di misure di livellazione, un confronto diretto tra livellazione e dati SAR è stata possibile unicamente nel periodo 2004-2006. In Tabella 3 vengono inoltre riportati i valori di velocità media annua relativi al sar ed alla livellazione.

Position	Vel (cm/year)	
	Benchmark	SAR
5	0.48	0.47
12	1.49	1.40
14	1.18	0.84

Tabella 3. SAR vs livellazione

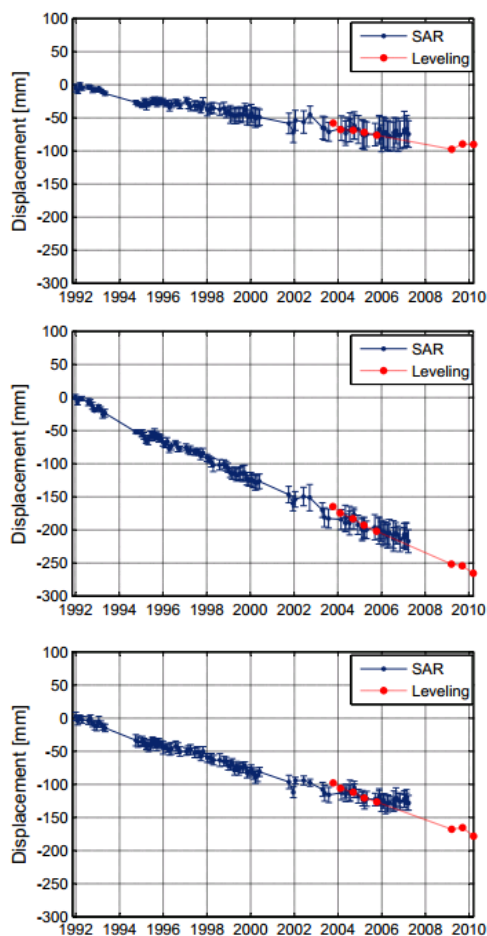
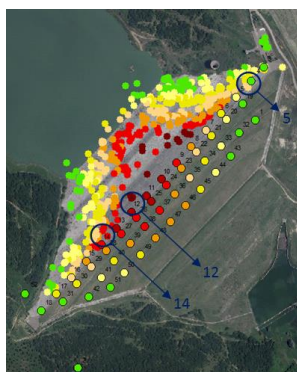


Figura 6. In alto individuazione dei prismi di livellazione e dei PS analizzati e messi a confronto; in basso confronto tra

serie storiche di spostamento ottenute da: DInSAR (linea blu) e misure di livellazione in cresta (linea rossa)

In entrambi i confronti, il fenomeno di subsidenza evidenziato dai sensori installati è in buon accordo con gli spostamenti ottenuti dall'elaborazione dei dati SAR (Figura 5 e Figura 6). Come indicato in Tabella 2 e Tabella 3, il coefficiente angolare (cioè la velocità media di spostamento) della linea di tendenza SAR per i punti selezionati è pienamente confrontabile con i valori ottenuti rispettivamente dai dati assestometrici e di livellazione.

### 3. TEST SITE 2 : CORBARA

#### 3.1 Diga di Corbara

La diga di Corbara, costruita negli anni 1959-1963, sbarrà il fiume Tevere a circa 4 km a monte della confluenza con il fiume Paglia nella stretta prospiciente l'abitato di Corbara e ricadente nei comuni di Orvieto e di Baschi. Il relativo serbatoio, della capacità utile di  $135 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (volume invaso  $192 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) ha funzione di regolazione mensile delle portate utilizzate nella centrale di Baschi (in caverna) della potenza nominale di 36180 kW e nelle successive centrali ad acqua fluente del Tevere (Alviano, Ponte Felice, Nazzano, Castel Giubileo). L'opera in argomento, il cui progetto originario (1955) è a firma del Prof. Ing. F. Arredi, ha un andamento planimetrico mistilineo ed è costituita da una struttura in calcestruzzo che si estende dalla sponda destra sino al tratto pianeggiante di fondovalle in sinistra per una lunghezza di 416 m, e da una diga zonata in materiali sciolti ammassata ai conci terminali della struttura muraria e che si sviluppa per circa 224 m a chiusura della sponda in sponda sinistra (Figura 7).

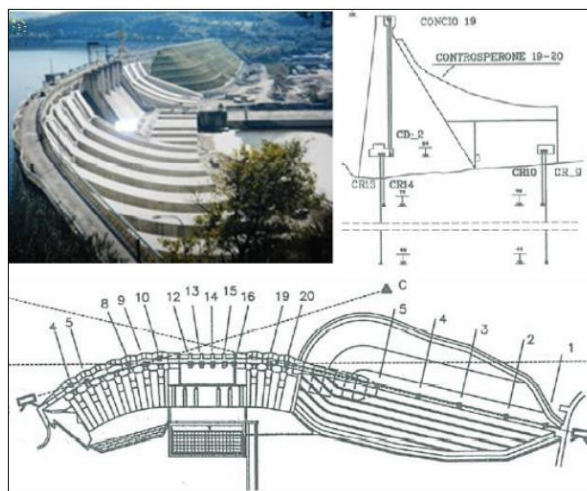


Figura 7. Diga di Corbara

#### 3.2 Rete di livellazione

La diga ha un robusto sistema di monitoraggio consistente in strumentazione tradizionale come collimatore ottico, pendolo, clinometri, ecc. Per questo lavoro ci si è concentrati sulle misure di livellazione relative al lato della diga in calcestruzzo. La rete di livellazione è composta da 28 punti posizionati come indicato in Figura 8. I punti 4 (lato sinistro), 11 (al centro) e 19 (lato destro) sono stati scelti per confrontare le misure di livellazione con la serie storica dei corrispondenti PS ottenuti dai dati DInSAR.

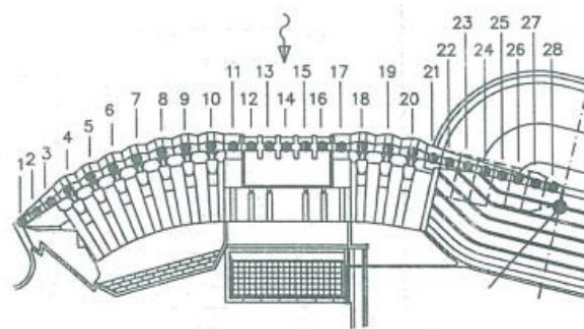


Figura 8. Rete di livellazione

### 3.3 Analisi DInSAR e confronto con le misure tradizionali

In questo lavoro, è stata applicata, come primo studio, la tecnica multi-sensore SBAS ad un dataset di immagini SAR ERS-ENVISAT a bassa risoluzione ascendente e discendente 1992-2010 (fonte IREA -CNR) (Bonano, 2012). La Figura 9 mostra la mappa della velocità media annua ascendente (in alto) e discendente (in basso), ma a causa della bassa risoluzione delle immagini ERS - ENVISAT (risoluzione spaziale 25m) e per la ridotta estensione planimetrica della cresta della diga, con questa analisi sono stati individuati pochi punti.

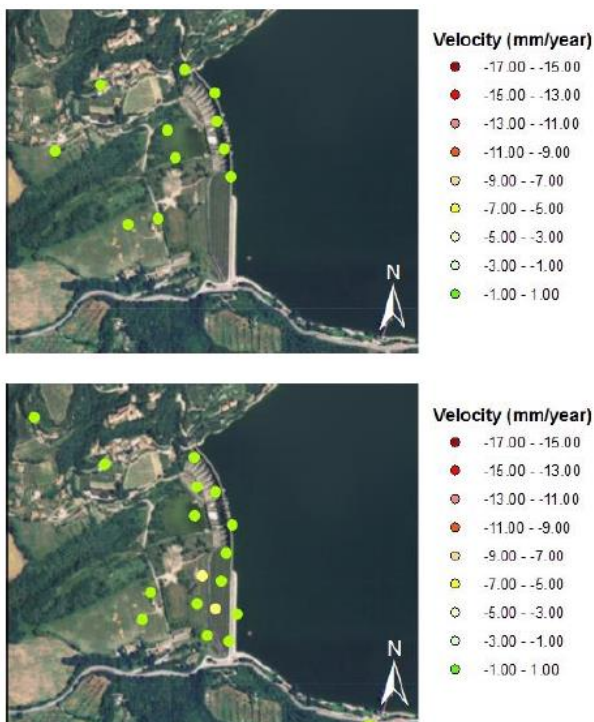


Figura 9. In alto mappa della velocità media annua ascendente ERS-ENVISAT (1992-2010); in basso mappa della velocità media annua discendente ERS-ENVISAT (1992-2010).

La nuova generazione di sensori satellitari SAR ad alta risoluzione consente invece di ottenere un notevole aumento dei punti misurati. La Figura 10 mostra una mappa di coerenza ottenuta da due acquisizioni SAR-COSMO SkyMed dove è chiaramente visibile il corpo diga e un ponte vicino alla diga.



Figura 10. Mappa di coerenza da COSMO SkyMed

Un set di dati di 35 immagini della diga di Corbara, acquisito nel periodo 2010-2014 con il sensore COSMO SkyMed (fonte ASI), è stato trattato con la tecnica DInSAR .

La Figura 11 mostra i risultati del trattamento in termini di velocità media annua; è ovvio che con il sensore COSMO SkyMed i punti individuati sono aumentati, riuscendo quindi ad effettuare una migliore analisi. La stessa figura mostra anche che tutti i punti hanno una velocità tra -1.00 e 1.00 mm / anno.



Figura 11. Velocità medie di punti sulla diga ottenute da analisi su immagini COSMO SkyMed.

I dati di livellazione relativi ai punti precedentemente indicati (4, 11 e 19), sono stati confrontati con i dati SAR, come mostrato in Figura 12. I PS scelti per il confronto sono quelli appartenenti ad un intorno di 2m del punto di livellazione analizzato; le velocità dei PS ricadenti in questo intorno sono quindi state mediate e confrontate con le misure di livellazione. La diga non presenta significativi spostamenti verticali durante il periodo analizzato, ma ci sono solo piccoli movimenti periodici a causa di variazioni del livello del serbatoio e variazioni di temperatura .

I punti esaminati sono in buon accordo con lo spostamento misurato l'elaborazione dei dati SAR.

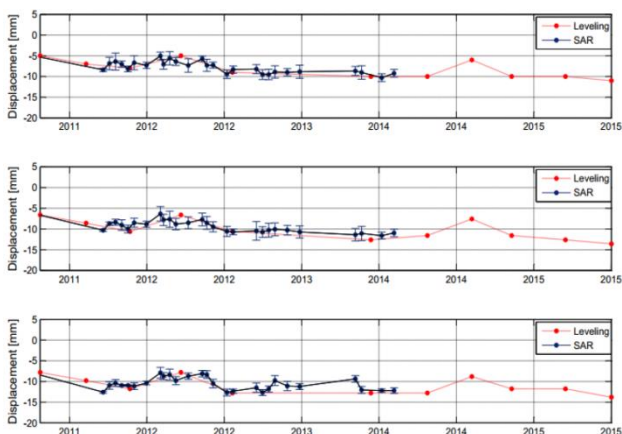


Figura 12. Confronto tra serie temporali di spostamento ottenute da DInSAR (linea blu) e livellazione (linea rossa).

#### 4. CONCLUSIONI

Le analisi effettuate sui dati satellitari non hanno la doppia orbita (ascendente e discendente), ma sono relativi ad una singola orbita; questo comporta generalmente l'impossibilità di determinare il verso di spostamento del punto analizzato. Tuttavia essendo spostamenti relativi a dighe, è lecito ipotizzare che gli spostamenti misurati siano imputabili a fenomeni di subsidenza.

In entrambi i casi studio l'analisi SBAS-DInSAR ha fornito dati utili per descrivere il comportamento delle dighe, permettendo di eseguire analisi anche in periodi in cui altri dati di monitoraggio non erano disponibili (sito di Genzano), e permettendo di attuare una procedura di calibrazione per impostare un modello numerico affidabile. Questo articolo mette a confronto le misure di spostamento acquisite da tecniche di monitoraggio tradizionali con tecniche innovative. Come evidenziato nell'analisi, i risultati SBAS-DInSAR sono in buon accordo con le misure terrestri. Questo approccio di monitoraggio è soprattutto prezioso per grandi dighe in cui un numero sufficiente di punti coerenti vengono rilevati dai sensori SAR. Dei bersagli artificiali costruiti appositamente possono essere progettati e posizionati in parti più significative della struttura al fine di migliorare i risultati della tecnica.

La disponibilità di immagini VHR di ultima generazione acquisiti da TerraSAR-X, COSMO-SkyMed e costellazioni SENTINEL si spera permetterà di ottenere migliori risultati in termini di risoluzione al suolo tempo di analisi per mezzo di algoritmi che producono risultati sempre più affidabili, come dimostrato per il sito di Corbara.

Inoltre, l'insieme di dati che sarà fornito dal sensore SENTINEL, permetterà di correlare facilmente le nuove acquisizioni con le immagini acquisite dalle missioni ERS / ENVISAT, causa della risoluzione comparabili.

Le tecniche SAR possono essere poi raccomandate per il monitoraggio di movimenti di dighe in calcestruzzo e pendii circostanti e, grazie alla sua elevata sensibilità, può stimare con precisione l'influenza delle varie cause di deformazione, come ad esempio la pressione dell'acqua nel serbatoio. Con l'utilizzo appropriato dei dati (COSMO, ecc), in termini di risoluzione temporale e spaziale, nonché con l'orientamento della linea di vista del satellite verso la diga, è possibile identificare con precisione i movimenti della diga, sia in continuo che in periodico.

#### BIBLIOGRAFIA

##### Riferimenti da giornali o atti di convegno

P. Berardino, G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti (2002), A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 40(11):2375–2383

M. Bonano, M. Manunta, M. Marsella, R. Lanari (2012) Long term ERS/ENVISAT deformation time-series generation at full spatial resolution via the extended SBAS technique. *Int J Remote Sens*

R. Lanari, O. Mora, M. Manunta, J. Mallorqui, P. Berardino, E. Sansosti (2004) A small baseline approach for investigating deformations on full resolution differential SAR interferograms. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 42:1377–1386.

D. Massonnet, KL Feigl (1998) Radar interferometry and its applications to changes in the Earth's surface. *Rev Geophys* 36:441–500.

##### Altri riferimenti stampati

Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e la Trasformazione Fondiaria in Puglia e Lucania (1985) Lavori per la costruzione di una diga in terra sulla Fiumarella di Genzano (perizia di variante e suppletiva) sezione tipo al 500, Direzione generale per le dighe e le infrastrutture idriche ed elettriche (M.I.T.), dicembre 1985.